

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra robotiky

Modulární manipulátor pro mobilní robot

Modular Manipulator for a Mobile Robot

Student

Bc. Aleš Vysocký

Vedoucí práce

Ing. Václav Kryš, Ph.D.

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Aleš Vysocký**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301T013 Robotika
Téma: **Modulární manipulátor pro mobilní robot**
Modular Manipulator for a Mobile Robot

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte rešerši v oblasti stávajících modulárních manipulátorů. Analyzujte možné principy spojování jednotlivých modulů.
2. Navrhněte koncepty modulů manipulátoru a stanovte pro ně nezbytné funkce. Analyzujte dostupné technické prostředky pro zajištění požadovaných funkcí. Sestavte podrobný požadavkový list pro modulární manipulátor.
3. Navrhněte varianty řešení modulů manipulátoru a jejich spojovacích ploch v souladu se sestaveným požadavkovým listem. Proveďte vzájemné zhodnocení navržených variant na základě zvolených kritérií a vyberte z nich tu nejlepší.
4. Zvolené varianty modulů rozpracujte do úrovně podrobných 3D modelů s využitím dostupného CAD systému. Výkresovou dokumentaci zpracujte v rozsahu určeném vedoucím práce. Navržené technické řešení doložte podrobnými návrhovými a kontrolními výpočty.
5. Práci též doložte v elektronické podobě ve formátu MS WORD.

Seznam doporučené odborné literatury:

ČSN 01 6910 *Úprava písemností psaných strojem nebo zpracovaných textovými editory*. Praha: Český normalizační institut, srpen 2007. 48 s.

ČSN ISO 690 *Informace a dokumentace - Pravidla pro bibliografické odkazy a citace informačních zdrojů*. Praha: Český normalizační institut, 2010.

SKAŘUPA, J.; MOSTÝN, V. *Metody a prostředky návrhu průmyslových a servisních robotů*. 1. vydání. Košice: Viena Košice, 2002. 190 s. ISBN 80-88922-55-0.

KÁRNÍK, L. *Servisní roboty*. 1. vydání. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2004. 139 s. ISBN 80-248-0626-6.

NOVÁK, P. *Mobilní roboty: pohony, senzory, řízení*. 1. vydání. Praha: BEN Praha, 2005. 247 s. ISBN 80-7300-141-1.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Václav Krys, Ph.D.**

Datum zadání: 31.10.2014

Datum odevzdání: 18.05.2015

prof. Dr. Ing. Petr Novák
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 15. 5. 2015

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі́, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 15. 5. 2015

.....

podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Aleš Vysocký

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Sarajevova 1, Ostrava – Zábřeh, 70030

Poděkování

Děkuji především panu Ing. Václavu Krysovi, PhD. za poskytnuté konzultace při přípravě mé diplomové práce.

ANOTACE

Diplomová práce se zabývá rešerší stávajících a návrhem nového řešení modulárního manipulátoru pro mobilní podvozek. Po stanovení požadovaných funkcí a parametrů systému jsou navrženy pohonné moduly zajišťující pohyb manipulátoru a pasivní moduly umožňující vytvoření požadované kinematické struktury. Moduly jsou spojovány mechanismem pro rychlou výměnu. Celý systém je navržen z běžně dostupných komponent.

ANNOTATION

Diploma thesis deals with research of existing and design of a new solution of modular manipulator for mobile chassis. There are necessary functions and requirements of the system defined. Then propulsion modules are designed for establishing the movement of the manipulator and passive modules creating the kinematic structure. Modules are connected together with quick change mechanism. The whole system is designed from standard components.

Obsah

Seznam použitého značení	10
Úvod.....	11
1 Analýza současných aplikací a možností.....	12
1.1 Mobilní roboty s manipulační nástavbou.....	12
1.2 Manipulační nástavby	14
1.3 Modulární manipulátory	19
1.4 Koncepty pohonů.....	22
1.5 Pohonné jednotky	24
1.6 Spojovací mechanismy	32
1.7 Měření momentu.....	35
2 Požadavkový list	37
2.1 Obecné parametry	37
2.2 Parametry pohonného modulu	38
2.3 Parametry propojovacího modulu.....	38
2.4 Parametry spojovací plochy.....	39
3 Předběžná dynamická analýza	40
3.1 Ruční výpočet	41
3.2 Analýza v systému SolidWorks.....	43
3.3 Analýza v systému Creo	45
3.4 Porovnání výpočtů	46
4 Návrh variant řešení	47
4.1 Výběr komponent	47
4.2 Koncepty konstrukcí	49
4.3 Varianta A.....	52
4.4 Varianta B	54
4.5 Varianta C	55
5 Porovnání variant řešení.....	56

6	Vypracování vybrané varianty	61
6.1	Pohonný modul	61
6.1.1	Volba řemene	65
6.1.2	Parametry nejvýkonnějšího pohonného modulu	68
6.2	Propojovací modul	69
7	Kontrola vybraných komponent	75
7.1	Kontrola kolíků na přírubách	75
7.2	Návrh a kontrola těsných per pro řemenice	76
7.3	Pevnostní kontrola hlavního rámu	79
7.4	Pevnostní kontrola připojovacího kroužku převodovky	80
7.5	Pevnostní kontrola výstupního dílu převodovky	81
7.6	Pevnostní kontrola kulisového kotouče	82
8	Vizualizace modulárního manipulátoru na mobilním podvozku	83
9	Závěr	85
10	Zdroje informací	87
11	Seznam příloh	90

Seznam použitého značení

Označení	Význam	Jednotka
a_{OM}	zrychlení objektu manipulace	$[m.s^{-2}]$
a_x	zrychlení v těžišti	$[m.s^{-2}]$
b	šířka těsného pera	$[mm]$
d	průměr kolíku	$[mm]$
d_{wx}	roztečný průměr řemenice	$[mm]$
g	tíhové zrychlení	$[m.s^{-2}]$
h	výška těsného pera	$[mm]$
i	převodový poměr	$[-]$
m_c	celková hmotnost manipulátoru	$[kg]$
m_{kx}	hmotnost kloubu	$[kg]$
m_x	hmotnost ramene	$[kg]$
p_D	dovolený tlak pro otláčení	$[MPa]$
p_{DOV}	dovolený tlak	$[MPa]$
t_{rx}	rozběhový čas	$[s]$
v_{OM}	rychlost objektu manipulace	$[m.s^{-1}]$
x_y	vzdálenost těžiště od osy rotace	$[m]$
$A_{MIN(MAX)}$	minimální (maximální) osová vzdálenost	$[mm]$
A_{SK}	skutečná osová vzdálenost	$[mm]$
F_2	síla působící na bok pera	$[N]$
J_x	moment setrvačnosti	$[kg.m^2]$
L	délka řemene	$[mm]$
L_{OM}	délka ramene od osy kloubu po objekt manipulace	$[m]$
L_x	délka ramene	$[m]$
M_K	krouticí moment pohonu	$[Nm]$
T_{Dx}	dynamický zátěžný moment	$[Nm]$
$T_{(MAX)}$	(maximální) výstupní moment	$[Nm]$
$T_{MOT(MAX)}$	(maximální) výstupní moment motoru	$[Nm]$
T_{Sx}	statický zátěžný moment	$[Nm]$
T_x	celkový zátěžný moment	$[Nm]$
W_K	průřezový modul v krutu	$[m^3]$
α	úhel opásání	$[^\circ]$
γ	doplňkový úhel	$[^\circ]$
ϵ_x	úhlové zrychlení	$[rad.s^{-2}]$
η	účinnost	$[\%]$
$\eta_{přev}$	účinnost převodovky	$[\%]$
$\eta_{řem}$	účinnost řemenového převodu	$[\%]$
τ_{DK}	dovolené napětí v krutu	$[MPa]$
τ_{DOV}	dovolené napětí	$[MPa]$
τ_{DS}	dovolené napětí ve střihu	$[MPa]$
ω_x	úhlová rychlost	$[rad.s^{-1}]$

Úvod

Mobilní roboty mohou být nasazeny v různých situacích a řešit rozličné problémy. Na každou úlohu je vhodná jiná manipulační nástavba. Navržením modulární konstrukce manipulátoru bude možno během krátké doby vytvořit sestavu vyladěnou pro provedení určené úlohy. Po jejím splnění bude manipulátor rychle přeskládán a připraven plnit úlohu jinou.

V práci je provedena rozsáhlá rešerše stávajících mobilních platforem s manipulátory, modulárních manipulátorů a dostupných komponent pro zajištění nezbytných funkcí navrhovaného systému. Na základě poznatků a analýzy příkladového řešení jsou stanoveny základní parametry pro návrh modulárního manipulátoru.

Několik vytvořených konceptů pohonných modulů demonstruje různé způsoby zajištění požadovaných funkcí. Detailně je rozpracována varianta nejlépe splňující požadavky na vysoký výkon a malé rozměry a hmotnost. Konstrukce je navržena z běžně dostupných dílů a s použitím standardních technologií výroby – třískového obrábění a 3D tisku.

Kromě pohonných modulů zajišťujících pohyb manipulátoru jsou navrženy pasivní propojovací moduly vytvářející kinematickou strukturu manipulátoru. Propojovací moduly mohou mít různé délky a tvary pro sestavení manipulační nástavby robotu přesně podle požadavků zadané úlohy. Moduly jsou propojovány rychlospojovacím mechanismem, který je v práci také navržen.

1 Analýza současných aplikací a možností

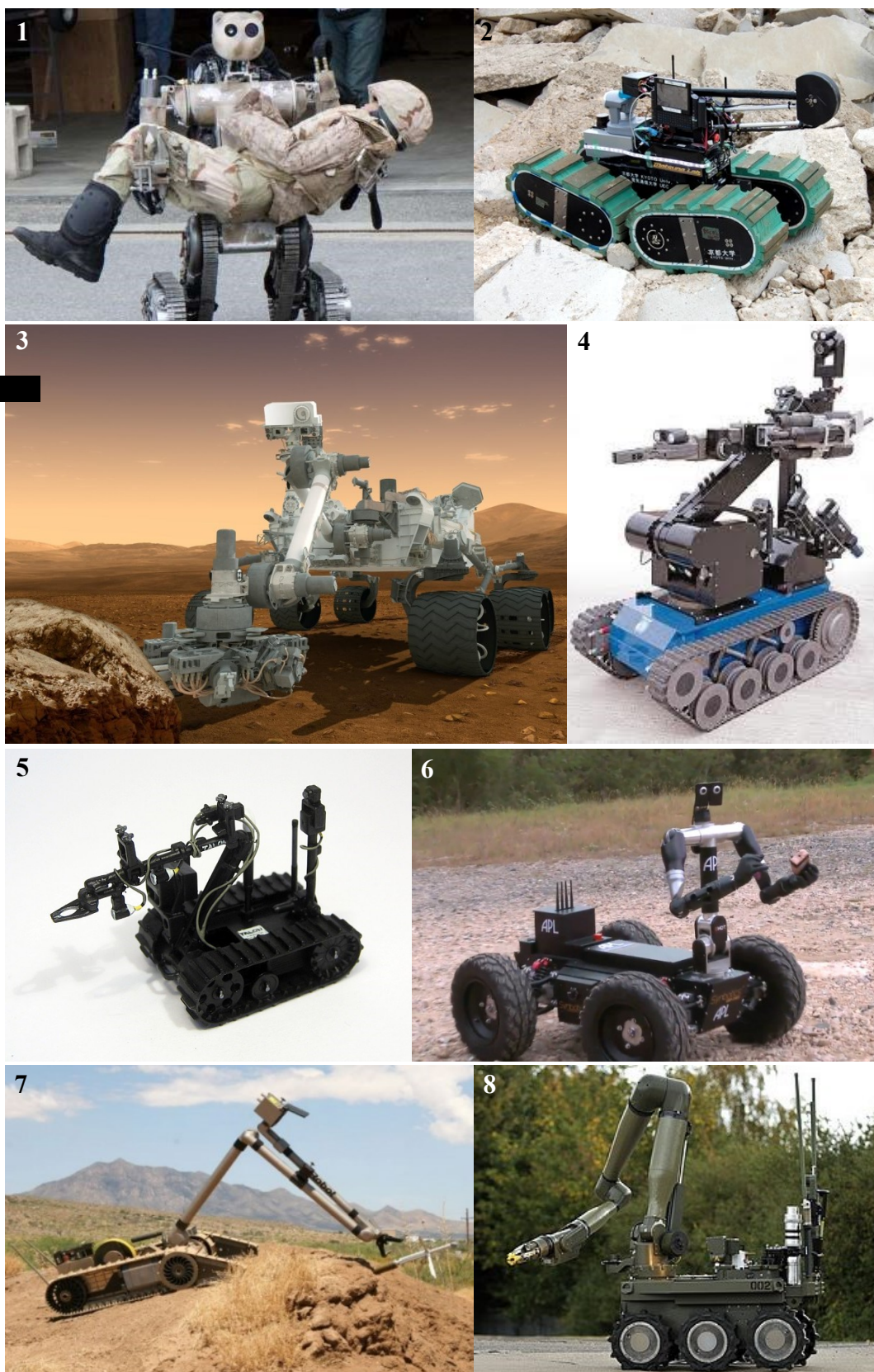
1.1 Mobilní roboty s manipulační nástavbou

Mobilní roboty s manipulační nástavbou v dnešní době již nejsou pouhými výzkumnými projekty v laboratořích nebo nepředstavitelně drahá zařízení pro výzkum mimo naši planetu. Tyto roboty nacházejí stále více možností k nasazení a uplatnění. To také souvisí s jejich stálým zdokonalováním hlavně v oblasti průchodnosti terénem, zdolávání překážek a také zvyšováním nosnosti a možností manipulační nástavby.

Roboty zatím nejsou vyráběny ve velkých sériích, jde tedy o finančně náročnější zařízení. Podle toho tedy odpovídají hlavní oblasti nasazení. Největší podíl má samozřejmě vojenství a bezpečnostní složky. Zde jsou využívány k průzkumu oblastí, které by mohly být pro člověka nebezpečné. Jedním z důvodů mohou být nástražná zařízení a výbušniny. Roboty pyrotechnických složek jsou někdy označovány jako EOD „Explosive Ordnance Disposal“, tedy roboty pro zneškodnění výbušnin. Roboty mohou nést zařízení k detekci i následnému zneškodnění výbušniny. Nástrojem pro získání přístupu, drobnou manipulaci a zneškodnění nebo převoz na likvidační místo může být právě manipulační nástavba s vhodným koncovým efektozem. Další možností je průzkum nepřehledných terénů, jako jsou například budovy. Robot získá informace o pozici nepřátel a opět pokud je vybaven potřebnou nástavbou, může je i zneškodnit.

Roboty s větší nosností dokážou odtáhnout zraněného vojáka do bezpečí. Zde už je možné vidět roboty nasazené i záchrannými složkami při živelných katastrofách nebo nehodách. Roboty mohou zkoumat nepřístupná prostředí, jako jsou jiné planety. Nyní se hlavně jedná o Mars, dále důlní komplexy, dno oceánu, inspekce potrubí. Po katastrofě v jaderné elektrárně Fukušima byly nasazeny v radioaktivním prostředí.

Jednou z oblastí nasazení je také skladování. Ať už jde o automatizované sklady, kde mohou roboty pracovat autonomně, tak i skladování toxických a radioaktivních látek, kde opět přítomnost člověka by mohla vést k ohrožení jeho zdraví.



Obr. 1.1 Přehled použití robotů s manipulační nástavbou. 1) BEAR [7], 2) KOHGA3 [8], 3) Curiosity [9], 4) tEODor [10], 5) Talon [11], 6) Robo Sally [12], 7) iRobot [13], 8) CUTLASS [14]

1.2 Manipulační nástavby

Manipulátor připojený k mobilní platformě výrazně zvyšuje možnosti jejího nasazení. Na obrázcích výše jde vidět, že existují různé způsoby využití manipulátorů a každý má své specifické požadavky. Není tedy jednotné kritérium pro porovnávání. Jsou manipulátory určené k přenášení a zvedání těžších břemen. U těchto ramen se neočekává výrazná přesnost a mohou být použity i hydraulické pohony, hlavním faktorem je vysoká nosnost. Naopak pro jemnou manipulaci a práci s malými předměty je vyžadována vysoká přesnost polohování koncového bodu. U univerzálních robotů je třeba tyto dva požadavky optimalizovat pro nejlepší výsledky při provádění požadované operace.


Pro různé úlohy jsou vhodné odlišné kinematické struktury a počet stupňů volnosti. Každý stupeň volnosti znamená pohon, což u velkých manipulátorů nemusí být problém, u těch menších s elektrickými pohony je však každý kilogram navíc nežádoucí. Například robot Talon [11] může být ve variantě s manipulátorem, který má pouze 2 stupně volnosti. Nepočítají rotaci koncového efektoru, ale znamená to, že rameno vykonává pohyb pouze v dvourozměrném prostoru, o třetí rozměr se postará podvozek. Toto řešení samozřejmě nemůže být moc přesné a vzhledem k rozměrům robotu a nosnosti manipulátoru ani určené k manipulaci s těžkými břemeny. Pro některé aplikace není přesnost tak důležitá, jako hmotnost a jednoduchost. Naopak robot iRobot má rameno s 8 stupni volnosti. Na článek s koncovým efektem navazuje ještě další, který má na konci kamerovou hlavu.


Z hlediska kinematické struktury mají manipulátory nejčastěji angulární schéma, kde rotační pohyb zajišťují vysoce převodované elektrické motory. Některá ramena s vyšší nosností mohou mít i hydraulické lineární pohony nebo lineární servopohony a pohyb je z translačního na rotační transformován. Není výjimkou i kombinace, kdy články nejbližší k robotu, které jsou nejvíce zatíženy, mají pohon lineární a vzdálenější články pohon rotační, lineární pohon může sloužit i podpůrně. Kromě rotačních kloubů mohou mít ještě ramena výsuv, který je většinou situován na posledním článku. Opět zde může být použit translační pohon nebo rotační pohon s transformací.


Speciálním případem jsou pak biorobotická zařízení jako je robot Robo Sally [12], se strukturou podobnou lidské ruce. Výrobce robotu se zabývá protetickými pomůckami. Implementací na mobilní podvozek vzniká robot sice s menší nosností, zato s excelentními možnostmi jemné a složité manipulace. Robot může být použit i v prostředí s lidmi. Pomocí rukou může vykonávat různá gesta a signály.


Charakteristiky vybraných manipulátorů


	Název robotu	Talón (standard arm)
	Typ pohonů	Elektrický
	DOF	2 + 2 Efektor
	Nosnost	4,5 – 9,07 kg
	Dosah	1300 mm
	Rozsahy	Rameno ↑: 180° Loket ↓: 270° Efektor ↔: 360° kontinuální Efektor čelisti: 101,6 mm


	Název robotu	Talón (heavy lift arm)
	Typ pohonů	Elektrický
	DOF	3 + 2 Efektor
	Nosnost	4,5 – 22,67 kg
	Dosah	1907,5 mm
	Rozsahy	Rameno ↔: ±200° Rameno ↑: 180° Loket ↓: 270° Efektor ↔: 360° kontinuální Efektor čelisti: 157,5 mm


	Název robotu	tEODor
	Typ pohonů	Elektrický
	DOF	6 + výsuv
	Nosnost	20 - 100 kg
	Dosah	2860 mm
	Rozsahy	Rameno ↔: ±205°
	Rozsahy	Rameno ↑: 144° – -85°
	Rozsahy	Loket ↓: ±110°
	Rozsahy	Loket ↔: 0 – 390 mm
	Rozsahy	Efektor ↔: 360° kontinuální
	Rozsahy	Efektor ↑: 120° – -95°
	Rozsahy	Efektor čelisti: 300 mm


	Název robotu	iRobot 310 SUGV
	Typ pohonů	Elektrický
	DOF	5
	Nosnost	3,2 – 6,8 kg
	Dosah	610 mm
	Rozsahy	Rameno ↔: 360° kontinuální
		Rameno ↑↓: 180°
		Loket ↑↓: ±180°
		Zápěstí ↔: 360° kontinuální
		Efektor čelisti: 127 mm

	Název robotu	iRobot 510 PackBot
	Typ pohonů	Elektrický
	DOF	8
	Hmotnost	9,32 kg
	Nosnost	4,54 – 13,61 kg
	Dosah	1870 mm
	Rozsahy	Rameno ↔: 360° kontinuální
		Rameno ↑↓: 220°
		Loket 1 ↑↓: 340°
		Loket 2 ↑↓: 340°
		Efektor ↔: 360° kontinuální
		Efektor čelisti: 180°
		Hlava ↔: 360° kontinuální
		Hlava ↑↓: 220°


	Název robotu	iRobot 710 Kobra
	Typ pohonů	Elektrický
	DOF	6
	Nosnost	35 – 150 kg
	Dosah	1905 mm
	Rozsahy	Rameno ↔: 360° kontinuální
		Rameno ↑↓: 220°
		Loket ↑↓: 320°
		Zápěstí ↑↓: 320°
		Efektor ↔: 360° kontinuální
		Efektor čelisti: 203 mm


	Název robotu	PIAP GRYF
	Typ pohonů	Elektrický
	DOF	5 + 1 efektor (+ 1 výsuv)
	Nosnost	5 – 15 kg
	Dosah	2350 mm
	Rozsahy	Dosah horizontální 1900 mm
		Dosah vertikální 2200 mm
		- na stojkách 2350 mm
		Efektor čelisti: 200 mm


	Název robotu	PIAP SCOUT
	Typ pohonů	Elektrický
	DOF	2 + 2 efektor (+ 1 výsuv)
	Nosnost	2,5 – 5 kg
	Dosah	1650 mm
	Rozsahy	Dosah horizontální 1500 mm
		Dosah vertikální 1170 mm
		- na stojkách 1650 mm
		Efektor čelisti: 200 mm

	Název robotu	CUTLASS
	Typ pohonů	Elektrický
	DOF	9
	Nosnost	25kg (100kg heavy lift verze)
	Dosah	4000 mm
	Rozsahy	Dosah horizontální: 2660 mm
		Dosah vertikální: 3660 mm
		Dosah s nadstavcem: (heavy lift verze) 4000 mm
		Efektor čelisti: 150 mm

	Název robotu	Jaguar
	Typ pohonů	Elektrický
	DOF	3 + 1 efektor
	Nosnost	4 - 10 kg
	Dosah	710 mm
	Rozsahy	Rameno \updownarrow : 360°
		Loket \updownarrow : $\pm 160^\circ$
		Efektor \leftrightarrow : 360° kontinuální
		Efektor čelisti: 150 mm

	Název robotu	CALIBER MK4
	Typ pohonů	Elektrický
	DOF	5 + 1 efektor
	Nosnost	59 – 90 kg
	Dosah	2870 mm
	Rozsahy	Rameno \leftrightarrow : 180°
		Rameno \updownarrow : 180°
		Efektor \leftrightarrow : 360° kontinuální
		Efektor čelisti: 300 mm

	Název robotu	CALIBER MK3
	Typ pohonů	Elektrický
	DOF	3 + 1 efektor + 1 výsuv
	Nosnost	29,5 kg
	Dosah	1810 mm
	Rozsahy	Rameno \updownarrow : 100°
		Efektor \leftrightarrow : 360° kontinuální
		Efektor čelisti: 250 mm

	Název robotu	CALIBER M5
	Typ pohonů	Elektrický
	DOF	4 + 1 efektor (+1 výsuv)
	Nosnost	8 - 20 kg
	Dosah	1680 mm (2670 mm)
	Rozsahy	Rameno \leftrightarrow : $\pm 120^\circ$
		Rameno \updownarrow : 180°
		Loket \updownarrow : 270°
		Efektor \leftrightarrow : 360° kontinuální
		Efektor čelisti: 250 mm

1.3 Modulární manipulátory

Modulární manipulátory jsou „stavebnice“, ze kterých jdou sestavit různé kinematické struktury podle požadavků aplikace. Moduly jsou většinou dvojího typu, aktivní, kdy jde o klouby s pohonnými jednotkami a pasivní, které slouží k propojení a získání požadovaného tvaru prostoru manipulace. Moduly jsou mezi sebou propojovány pomocí přírub, které mohou mít jednoduchý zamykací systém pro snadnou a rychlou výměnu. Řídicí informace a napájení jsou sdíleny externě například pomocí krouceného kabelu. Externí propojení však představuje riziko poškození kabelu nebo jeho zachycení. Výhodnou, ale komplikovanější variantou je tedy vedení kabeláže uvnitř modulů a propojení konektory na přírubách.

Pohonné kloubové moduly mají jednu nebo i dvě rotační osy, dále mohou být moduly translační s lineárním pohonem a v neposlední řadě je součástí manipulátoru koncový efektor. Pro optimalizaci soustavy je důležité mít na výběr z několika výkonnostních řad pohonů. Klouby nejbližší k základně musí mít dostatečný výkon, aby mohly bez problému manipulovat s objekty manipulace a navíc pohybovat s celým ramenem. Moduly blíže ke koncovému efektoru už mohou mít výkon nižší, zato musí být co nejlehčí.

Pasivní moduly jsou distanční nebo tvarové prvky propojující klouby. Součásti musí mít nízkou hmotnost, ale vysokou pevnost a tuhost. Materiály používané na spojovací moduly jsou tedy hliník nebo kompozitní materiály. Pokud je kabeláž vedena uvnitř, musí být v modulu k tomu určený prostor a uchycení, aby nedošlo k poškození nebo nežádoucím vibracím. Pasivním modulem by mohla být vedena i vložená hřídel přenášející krouticí moment do dalšího modulu, to však pro modulární roboty není typické. Pro potřeby koncového efektoru je možné vést manipulátorem hadice s tlakovým vzduchem.

Moduly mají každý svou řídicí elektroniku a pomocí sběrnice jsou propojeny. Každá pohonná jednotka dokáže tedy zpracovávat informace o požadované poloze. Ve virtuálním prostředí se podle detekované kinematické struktury vypočítá výsledné natočení kloubů a moduly pak již samy provedou žádaný pohyb s optimálními parametry. Zpětnovazebně mohou navíc informovat o úspěšném dosažení polohy nebo díky momentovým senzorům posílat informace o přetížení.

Společnost SCHUNK nabízí dva angulární modulární manipulační systémy. Prvním je Powerball Lightweight Arm LWA 4P [15], ten je složený z pohonných modulů ve tvaru koule, které mají dvě osy rotace, a ze dvou pasivních modulů. Nabízený komplet má 6 stupňů volnosti, tedy 3 kulové pohonné jednotky. K jednotlivým modulům nejsou poskytnuty informace, charakteristiky v tabulce se týkají nabízené sestavy. Poměr hmotnosti k nosnosti je u těchto manipulátorů 2:1. Díky provoznímu napětí 24 VDC a nízké spotřebě energie mohou být provozovány na baterie.

	DOF	6
	Nosnost	6 kg
	Dosah	1460 mm
	Rozsahy	Rameno ↔: ±170°
		Rameno ↓: ±170°
		Loket ↓: ±155,5°
		Loket ↔: ±170°
		Zápěstí ↓: ±170 °
		Zápěstí ↔: ±170°

Druhou řadou je Dextrous Lightweight Arm LWA 4D se sedmi stupni volnosti. Systém má několik velikostí válcových pohonných modulů spojovaných tvarovými díly. Manipulátor je robustní a výkonný. Dodatečná osa navíc zvyšuje jeho flexibilitu. Sestava může být jednoduše adaptována pro různé robotické aplikace.

	DOF	7
	Nosnost	10 kg
	Dosah	1113,4 mm
	Rozsahy	Rameno ↔: ±180°
		Rameno ↓: ±123°
		Loket ↔1: ±180°
		Loket ↓: ±125
		Loket ↔2: ±180°
		Zápěstí ↓: ±170 °
		Zápěstí ↔: ±170°

Modulárními rameny se zabývá také firma Robotic Research [16], která má v nabídce velké spektrum modulů. Základní sestavy mají většinou 7 stupňů volnosti s dosahem od 660 do 1830 mm a nosností od 5,4 do 74 kg. Vysoká tuhost umožňuje opakovatelnou přesnost polohování lepší než 0,05 mm. Manipulátor má propracované řízení s algoritmy pro vyhodnocování singularit, plánování trajektorie pohybu a výpočet pozic pro redundantní strukturu.



Obr. 1.2 Modulární manipulátor Robotics Research

Některé další firmy jako KUKA [17] nebo Kinovarobotics [18] nabízejí manipulátory připomínající modulární strukturu, nejsou však uživatelsky konfigurovatelné a jsou nabízeny pouze jako nerozebíratelný celek, v případě KUKA v několika různých nosnostech. Modulárními manipulátory se zabývají také některé projekty na univerzitách a kromě angulárních sestav existují také kartézské roboty nebo paralelní struktury.



Obr. 1.3 Manipulátor KUKA iiwa a Kinova JACO

1.4 Koncepty pohonů

Nejčastěji používaným způsobem pohonu rotačních článků je sestava motoru, převodovky, brzdy popřípadě snímačů vsazená přímo do kloubu manipulátoru. Největší výhodou tohoto řešení je, že krouticí moment nemusí být přenášen na větší vzdálenost nebo měnit směr. Převody znamenají energetické ztráty, snížení přesnosti zejména kvůli vůlím a nedostatečné tuhosti, mohou způsobovat nežádoucí vibrace a vyžadují složitější konstrukci ramen s prostorem pro daný převod. Na druhou stranu pohon v kloubu zatěžuje pohon v předchozím kloubu. Sestava pohonu musí být kompaktní, aby kloub byl co nejmenší a nejlehčí, také dostatečně výkonná, aby kloub bez problému pohyboval navazujícími články. Pokud jsou energie a data vedena uvnitř ramen, musí pohon umožnit prostupnost kabeláže případně hadic.



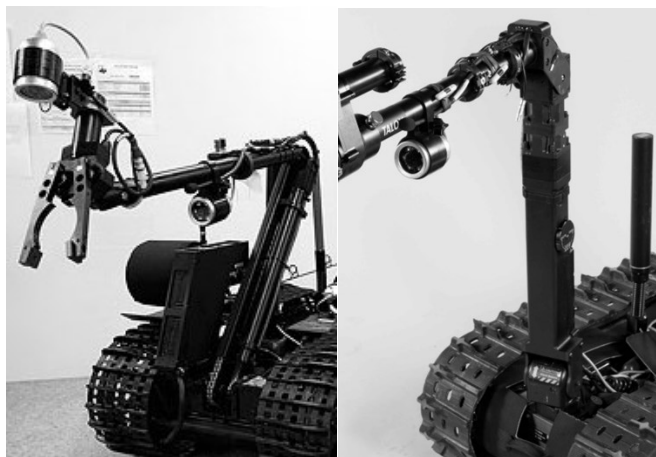
Obr. 1.4 Pohon v kloubu. Vlevo iRobot 510, vpravo PIAP GRYF [19]

V modulárních systémech je pohon v kloubu nejčastější alternativou. Mohou být například ve formě kloubových modulů spojovaných distančními pasivními nástavci různých délek a tvarů.



Obr. 1.5 Modulární systémy K-1207i (vlevo) a pohonné jednotky SCHUNK

Dalším možným způsobem pohonu kloubu je distribuce krouticího momentu z pohonu umístěného například v kloubu předchozím nebo na rameni. Pro tuto variantu je potřeba převodu, který může být realizován pomocí řetězu, řemenu nebo hřídele uvnitř ramene. Pro změnu směru otáčení jsou použita ozubená soukolí. Přesunem pohonu z kloubu můžeme docílit snížení hmotnosti manipulátoru nebo jeho části a použití menších motorů. Nevýhody jsou zmíněny výše.



Obr. 1.6 Lehká verze manipulátoru robotu Talon s řetězovým převodem (vlevo) a silnější verze s pohonem naklápění prvního článku v základu a naklápění druhého článku v těle článku prvního

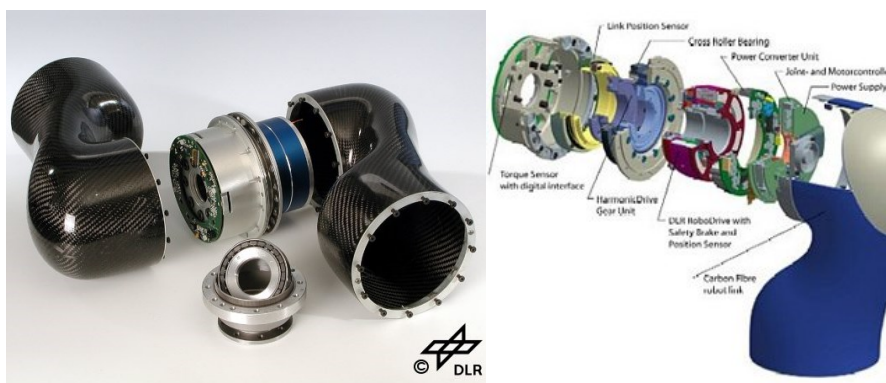
Kromě rotačních mohou být použity také translační pohony. Ty jsou používány k teleskopickým výsuvům posledního článku nebo jako podpora rotační jednotky, jako je tomu u robotu CUTLASS, nebo přímo k pohonu, což je vidět na robotech CALIBER [20]. Translační pohon musí být vhodně upevněn, aby mohl pohybovat rotačním kloubem. Běžné statické upevnění neumožňuje velký rozsah pohybu, mohou být tedy použity pákové mechanismy pro zvýšení rozsahu pohybu kloubu.



Obr. 1.7 Robot CALIBER MK3 s rozsahem naklápění prvního článku 100° (vlevo) a robot CALIBER MK4 s rozsahem 180° díky pákovému mechanismu (uprostřed), ARM manipulátor (vpravo)

1.5 Pohonné jednotky

Rotační pohonná jednotka manipulátoru je tvořena v základu motorem a převodovkou. Aby nedocházelo k pohybu, když je motor zastaven, je do sestavy zařazena brzda. Brzda je bez přivedení energie zabrzdnuta a přivedením proudu se odbrzdí, to zajišťuje bezpečnost při odpojení manipulátoru od zdroje energie. Další komponentou je snímač pozice. Na hřídel motoru bývá připojen inkrementální enkodér, který dává zpětnou vazbou informaci o natočení hřídele motoru. Za převodovkou, tedy na výstupu pohonné jednotky může být další snímač, který dává informaci o aktuální pozici článku. O řízení motoru a zpracování zpětné vazby se stará řídicí jednotka. Do sestavy je možné zařadit také snímač zatěžujícího krouticího momentu, bezpečnostní prvek pro detekci kolize a ložiska, která zachytí ohybové momenty. Všechny tyto komponenty musí být vměstnány do kloubu, jedná se tedy o velice kompaktní součástky.




Obr. 1.8 Komponenty kloubu LWR [21]


Kompaktních pohonů je široká škála, proto je výběr omezen jednou z podmínek, která bude v požadavkovém listu. Napětí 24 - 48 V výrazně omezí rozsah použitelných pohonných jednotek. To platí hlavně pro nabízené kompaktní sestavy motoru a převodovky. Hlavními parametry, které je třeba brát v úvahu, jsou rozměry, nominální moment, a také jestli je zde možnost duté hřídele, což je výhodné pro vedení kabeláže do dalšího článku.

Některé firmy nabízejí již kompletní sestavy motoru s převodovkou případně s enkodérem i brzdou. Tyto sestavy přináší výhody, že jsou komponenty již spojeny a není třeba dalších spojovacích mezipřírub. Nevýhodou může být, že sestavy jsou nabízeny pouze v několika variantách, a tak může být obtížné vybrat podle zadaných požadavků. Pokud tuto sestavu nabízí výrobce převodovek, nemusí být součástí sestavy nejkompaktnější motor nebo naopak.


Firma Harmonic Drive [23] nabízí sestavy pracující s napětím 24 VDC. Sestava se skládá z harmonické převodovky a elektromotoru, případně je možnost doplnit brzdu i enkodér. V řadě FHA-C je to nejmenší modul FHA-17C s převodovými poměry 50, 100 a 160. Sestava má dutou hřídel, je kompaktní a disponuje vysokou tuhostí, přesností a krouticím momentem. Celek je snadno zabudovatelný do ramene robotu. Jedna část je připojena na otvory vnějšího pláště a druhá na točivou přírubu harmonické převodovky. Inkrementální enkodér je zabudován přímo v modulu a brzda je volitelnou součástí.

	Převodový poměr	50	100	160
	Nominální moment (Nm)	39	57	64
	Otáčky (min⁻¹)	96	48	27
	Průměr (mm)	128		
	Průměr duté hřídele (mm)	18		
	Délka (mm)	78 (93.5 s brzdou)		
	Maximální zatížení	Axiální 9,8 kN, Radiální 2,9 kN, 188 Nm		
	Hmotnost (kg)	2,5		


V řadě FHA-C mini to jsou potom FHA-8C, FHA-11C a FHA-14C. Každá sestava je s třemi převodovými poměry 30, 50 a 100. Nejmenší verze začíná na momentu 1,8 Nm, největší s převodovým poměrem 100 disponuje krouticím momentem 28 Nm. V tabulce jsou hodnoty modulu FHA-14C, tedy nejsilnější sestavy v této řadě. Komplet má opět dutou hřídel pro vedení kabeláže. U tohoto modelu je možnost výběru mezi inkrementálním a absolutním enkodérem.

	Převodový poměr	30	50	100
	Nominální moment (Nm)	9	18	28
	Otáčky (min⁻¹)	200	120	60
	Šířka x Výška (mm)	75 x 90		
	Průměr duté hřídele (mm)	13,5		
	Délka (mm)	66 (78 ABS enkodér)		
	Maximální zatížení	Axiální 500 N, 75 Nm		
	Hmotnost (kg)	1,2 (1,3)		

Slovenská firma Spinea [24] je výrobcem vysoce přesných reduktorů pracujících na principu cykloidní převodovky. Tato firma nabízí aktuátory pod obchodní značkou DriveSpin. Pohony jsou označeny DS 50, DS 70 a DS 110. Každý produkt je nabízený v široké škále modifikací a převodových poměrů. Součástí mohou být různé typy polohové zpětné vazby, brzda, teplotní snímače. Verze s dutou hřídelí má označení DSH 70 a DSH 110. Nejmenší DS 50 je pouze ve verzi s převodovým poměrem 63.


	Převodový poměr	63
	Nominální moment (Nm)	18
	Otáčky (min⁻¹)	~63 (4000 vstup)
	Šířka x Výška (mm)	50 x 77,3
	Délka (mm)	99 (136,6 s brzdou)
	Maximální zatížení	Axiální 1,9 kN, Radiální 1,44 kN, 44 Nm
	Hmotnost (kg)	1,15 (1,35)

Verze DS 70 a DS 110 se od menší DS 50 liší a je možné je objednat s různými převodovými poměry. Verze s dutými hřídeli DSH jsou pouze ve verzi bez brzdy. V následující tabulce jsou parametry pohonu DS(H) 70, pohon DS(H) 110 se už pohybuje v délce větší než 200 mm a není zde proto specifikován.


	Převodový poměr	57	75
	Nominální moment (Nm)	50	66
	Otáčky (min⁻¹)	~43(2500)	~33(2500)
	Šířka x Výška (mm)	74 x 114,5	
	Délka (mm)	115 (168 s brzdou) 152,2 (DSH)	
	Průměr duté hřídele (mm)	12	
	Maximální zatížení	Axiální 4,1 kN, Radiální 2,8 kN, 142 Nm	
	Hmotnost (kg)	2,4 (2,9)	

Další možností je výběr motoru a převodovky zvlášť. Pro manipulátor je důležitá kompaktnost a vysoký převodový poměr. Tyto parametry splňují harmonické a cykloidní převodovky. Tyto převodovky mohou být zatíženy velkým krouticím momentem, disponují vysokou životností a jsou velmi přesné. Většinou jsou udávány nulové vůle a vysoká opakovaná přesnost. Výhodou je tichý a plynulý chod. Cykloidní převodovky vynikají svou tuhostí.


Firma Harmonic Drive má široké portfolio harmonických a planetových převodovek. Nejkompaktnější jsou převodovky z řady Ultra Flat CSD a SHD. Převodovky CSD jsou ve dvou variantách: s dutou hřídelí CSD – 2UF, která je v tabulce a neprůchozí varianta CSD – 2UH. Převodovky jsou nabízeny v různých velikostech a převodových poměrech, takže jsou udány rozsahy nejmenší a největší verze.


	Převodový poměr	50 – 160
	Nominální moment (Nm)	3,7 – 206
	Průměr (mm)	70 – 170
	Délka (mm)	22 – 45
	Průměr duté hřídele (mm)	9 – 37
	Maximální zatížení	Axiální 1,2 – 9,2 kN, Radiální 0,8 – 6,2 kN, 91 – 849 Nm
	Hmotnost (kg)	0,5 – 5,7

Druhou variantou ultratenké převodovky je série SHD, která je ještě kompaktnější.


	Převodový poměr	50 – 160
	Nominální moment (Nm)	3,7 – 206
	Průměr (mm)	70 – 170
	Délka (mm)	17,5 – 33
	Průměr duté hřídele (mm)	11 – 40
	Maximální zatížení	Axiální 1,7 – 13,1 kN, Radiální 1,18 – 8,7 kN, 37 – 424 Nm
	Hmotnost (kg)	0,33 – 3,09

Kompaktní převodovky CSG – 2UH jsou robustnější a jsou určené k přenosu vyšších momentů. Tato řada má menší průměry průchozích otvorů, ale v nabídce je alternativa SHG – 2UH, která má stejné hodnoty momentů a dutou hřídel.

	Převodový poměr	50-160
	Nominální moment (Nm)	7 – 1236
	Průměr (mm)	73 – 260
	Délka (mm)	41 – 115
	Průměr duté hřídele (mm)	7 – 44
	Maximální zatížení	Axiální 2,8 – 29,3 kN, Radiální 1,6 – 22,6 kN, 41 – 1860 Nm
	Hmotnost (kg)	0,52 – 20,9 (0,32 – 16,2)

	Převodový poměr	50 – 160
	Nominální moment (Nm)	7 – 1236
	Průměr (mm)	74 – 284
	Délka (mm)	52.5 – 128
	Průměr duté hřídele (mm)	14 – 80
	Maximální zatížení	74 – 2740 Nm
	Hmotnost (kg)	0,71 – 28,5 (0,55 – 23,3)

Druhým typem kompaktních převodovek jsou cykloidní převodovky TwinSpin, které nabízí firma Spinea. Série s dutou hřídelí je označena písmenem H. Reduktory jsou v pěti velikostech s různými převodovými poměry. V tabulce je opět uveden rozsah mezi nejmenším a největším modelem.

	Převodový poměr	55 – 125
	Nominální moment (Nm)	50 – 1100
	Průměr (mm)	85 – 238
	Délka (mm)	60.5 – 123,5
	Průměr duté hřídele (mm)	13 – 65
	Maximální zatížení	Axiální 4,1 – 35,5 kN, Radiální 2,8 – 22,5 kN, 142 – 4400 Nm
	Hmotnost (kg)	1 – 26

K převodovce je potřeba vybrat vhodný motor opět s kompaktními rozměry. Vybrány jsou motory pouze pracující s napětím 24 - 48 VDC. Pro tuto aplikaci by mohly být vhodné bezkartáčové motory v plochých verzích, označované FLAT nebo PANCAKE, dále pak kompaktní servomotory nebo bezrámové motory. Pro vedení kabeláže nebo průchozích hřídelí jsou také některé motory s průchozím středem.

Firma Allied Motion [25] nabízí momentový motor s průchozí hřídelí a zabudovaným optickým enkodérem.




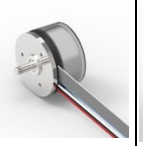
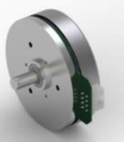
	Výkon (W)	56
	Nominální moment (Nm)	0,215
	Maximální moment (Nm)	2,32
	Nominální otáčky (min⁻¹)	-
	Otáčky naprázdno (min⁻¹)	2027
	Průměr (mm)	75,95
	Délka (mm)	53,54
	Průměr duté hřídele (mm)	19
	Hmotnost (kg)	0,51

Dalším z motorů je IR9 od firmy Printed Motor Works [26]. Motor má také dutou hřídel a kompaktní rozměry. Průměr motoru je 98 mm a délka 78.2 mm. Není však dostupný katalog výkonových charakteristik pro napětí 24 VDC. Nižší výkon má motor od firmy Technohands [27], která nabízí motory s dutou hřídelí o průměru 8,5 nebo 22,5 mm. Moment je však pouze 0,05 Nm.






Diskové servomotory firmy Printed Motors [28] disponují také kompaktními rozměry a možností duté hřídele. Dva modely pracují s napětím 24 VDC. Jsou to modely KN 12 M4 LR a KN 16 M4 LR.

	Výkon (W)	250	700
	Nominální moment (Nm)	0,8	2,15
	Maximální moment (Nm)	7,2	15,05
	Nominální otáčky (min⁻¹)	3000	3000
	Otáčky naprázdno (min⁻¹)	6000	6000
	Průměr (mm)	140	188
	Délka (mm)	34,2	83,7
	Průměr duté hřídele (mm)	15	15
	Hmotnost (kg)	2,8	6

Pokud by kabeláž nebyla vedena skrz pohonnou jednotku, je možné použít motory s plnou hřídelí. Firma Maxon [29] má řadu bezkartáčových motorů na stejnosměrné napětí označovanou EC flat. K dispozici je široké spektrum výkonů od 2 do 100 wattů. Motory mohou být s Hallovými sondami, integrovanou elektronikou nebo bez krytí. Na výběr jsou různé průměry motorů s různými výkony a otáčkami. V tabulce jsou motory s největšími krouticími momenty, které tato firma nabízí.

					
Označení	EC 45	EC 45	EC 60	EC 60	EC 90
Výkon (W)	70	50	100	100	90
Nominální moment (Nm)	0,12	0,13	0,22	0,28	0,44
Maximální moment (Nm)	0,14	0,15	4,18	4,18	4,94
Nominální otáčky (min⁻¹)	4860	3000	3840	3740	2590
Otáčky naprázdno (min⁻¹)	6110	3000	4250	4250	3190
Průměr (mm)	42,8	50	68	68	90
Délka (mm)	26,7	33,8	38	38	26,9
Hmotnost (kg)	0,14	0,26	0,47	0,47	0,6

Kompaktní servomotory od firmy MOOG Animatics [30] jsou kombinací motoru, řídicí jednotky, servozesilovače, enkodéru a komunikační jednotky. Podporovány jsou sběrnice CanOpen a DeviceNet, u některých i Profibus. Součástí sestavy může být navíc brzda napájená z motoru, takže není třeba vnějšího zapojení. Servosystémy pod označením SmartMotor jsou ve třech velikostních (šířka čela) variantách 17, 23 a 34. Podle výkonu mají sestavy různou délku. Elektronika je u některých modelů umístěna vedle motoru, u většiny pak v prostoru za motorem. Označení T znamená, že motor má vyšší moment a nižší otáčky. Motory mohou být používány s různým napětím a parametry v tabulkách jsou udávány pro 48 V, pro 24 V byly hodnoty vyčteny z přiložených charakteristik, jsou tedy přibližné. V tabulce jsou uvedeny některé modely. Řada servomotorů ještě pokračuje vyššími výkony do přibližně 240 W, jejich délky už jsou však větší a pohon by se nedal použít v kloubu.

					
Označení	SM23165DT	SM23375DT	SM34165D	SM34165DT	SM34205D
Výkon (W)	75	65	100	310	110
Nominální moment (Nm)	0,5	0,59	1,09	1,45	0,89
Maximální moment (Nm)	0,84	1,11	1,6	3,39	2,81
Nominální otáčky (min⁻¹)	1450	1000	850	1200	1200
Otáčky naprázdno (min⁻¹)	2800	2100	1700	2800	2400
Šířka x Výška (mm)	57,2x77,5	57,2	86,4x105,4	86,4x105,4	82,6
Délka (mm)	58,42	115,3	95,1	95,1	105,1
Délka s brzdou (mm)	90,2	143,8	135,4	135,4	154,6
Hmotnost (kg)	0,45	0,98	2,27	2,49	1,59

Jednou z možností by mohlo být i použití bezrámových prstencových motorů. Tyto motory dokážou vyvinout velké kroučící momenty s malými zástavbovými rozměry. Nevýhoda je, že je potřeba navrhnout zabudování a krytí, protože motor je zcela otevřený a mohou se do něj dostat nečistoty nebo vlhkost. Firma Applimotion [31] nabízí velké portfolio motorů s různými průměry a šířkami od 29 mm vnějšího průměru statoru až po 533 mm.



Obr. 1.9 Rotor a stator prstencového motoru

Vnější průměr (mm)	56	63	76	100
Šířka (mm)	47	52	70	25
Proud (A)	13,4	4,9	3,5	8,2
Nominální moment (Nm)	0,54	1,04	0,49	1,75
Maximální moment (Nm)	1,63	3,13	1,49	5,28
Otáčky naprázdno (min⁻¹)	5100	968	1446	960
Hmotnost (kg)	0,32	0,53	0,3	0,64

Data v tabulce jsou opět orientační pro několik vybraných modelů.

1.6 Spojovací mechanismy


Jednotlivé moduly musí být spojeny spojovacím mechanismem. Mechanismus musí splňovat několik kritérií. Prvním kritériem je přenos sil a krouticích a klopných momentů. Mechanismus po aretaci musí být tuhý a musí přenést veškeré síly a momenty z jednoho modulu na druhý. Druhým kritériem je přenos potřebných energií a dat. Pokud je datová a energetická kabeláž vedena vnitřním prostorem modulů, musí spojovací moduly umožnit konektivitu mezi sousedními moduly. Konektory by měly být robustní, aby nedošlo k jejich poškození častým spojováním a rozpojováním mechanismu. S konektory souvisí také krytí, jelikož jde o přenos elektrické energie, nesmí se dostat do mechanismu vlhkost. Třetím kritériem je snadné spojování a rozpojování modulů. Mechanismus musí být opakovaně spojitelný a rozpojitelý bez poškozování jeho částí. Při zamknutí je mechanismus dostatečně tuhý a přenáší veškeré zatížení. Zámek se nesmí nekontrolovaně otevřít vlivem vibrací nebo pohybu modulů, mohlo by dojít k nebezpečným situacím a možnému ohrožení okolí. Zámek, na druhou stranu, musí být snadno odemykatelný bez vynaložení větších sil.


Spojovací mechanismy mohou být zamykány pomocí elektrických nebo pneumatických pohonů, ale také manuálně. Použití manuálních mechanismů se z hlediska několika faktorů jeví jako lepší řešení. Hmotnostně mohou být mechanismy s pohonem a manuální podobné. U mechanismů pro vyšší zatížení však narůstá hmotnostní rozdíl ve prospěch manuálně zamykatelných zařízení. Dalším faktorem jsou rozměry, kdy manuální mají výrazně menší průměr i šířku. Faktory jako cena a jednoduchost jsou zřejmé. Jedním z důležitých faktorů je, že při použití manuálních mechanismů se předpokládá, že obsluha podpírá odebíraný modul a nemůže se tedy stát, že po dálkovém rozpojení mechanismu modul odpadne, což by vedlo k možnému poškození modulu i okolních zařízení.

Prvním z modulů je miniaturní systém MWS od firmy Schunk [32], ten pracuje na principu kuliček zapadajících do drážky ovládaných pomocí palce na straně mechanismu.


	Zátěž (kg)	0,5
	Nominální klopný moment (Nm)	0,5
	Nominální krouticí moment (Nm)	0,2
	Průměr průchozího středu (mm)	7,5
	Hmotnost (kg)	0,007 + 0,009
	Elektrické kanály	6
	Průměr (mm)	20
	Šířka (mm)	10

Manuálně zamykatelných mechanismů nabízí firma Schunk několik. Miniaturní a extra tenké mají minimální rozměry, jejich únosnost je však omezená. Dalšími zařízeními jsou ultra tenké systémy FWS.

	Zátěž (kg)	16
	Nominální klopný moment (Nm)	50
	Nominální krouticí moment (Nm)	35
	Průměr průchozího středu (mm)	31,5
	Hmotnost (kg)	0,093 + 0,052
	Elektrické kanály	(8)
	Průměr (mm)	78
	Šířka (mm)	16,1

	Zátěž (kg)	10
	Nominální klopný moment (Nm)	40
	Nominální krouticí moment (Nm)	100
	Průměr průchozího středu (mm)	33
	Hmotnost (kg)	0,2 + 0,1
	Elektrické kanály	(10)
	Průměr (mm)	90
	Šířka (mm)	15


Pro vyšší zátěže nabízí firma Schunk řadu mechanismů HWS. Ty jsou zamykány pomocí ruční páky. Středem otvoru vede tvarová zářezka, která otočením páky zapadne do drážky protikusu. Konektory nejsou vedeny středem, ale k mechanismu je připojen box s 19 nebo 26 pinovým konektorem.

	Zátěž (kg)	8 – 54
	Nominální klopný moment (Nm)	50 – 320
	Nominální krouticí moment (Nm)	40 – 250
	Průměr průchozího středu (mm)	(25 – 80)
	Hmotnost (kg)	(0,14 – 2,4) + (0,08 – 1,52)
	Elektrické kanály	19 – 26
	Průměr (mm)	60 – 185
	Šířka (mm)	39 – 78


Další manuální spojovací mechanismy nabízí firma ATI industrial automation [33]. Nabízí kromě široké škály pneumatických systémů jeden menší manuální mechanismus pro zátěž 2,3 kg a potom dva modely pro 16 a 36 kg. Zamykání je zde pomocí kuliček a šroubu s kuželem.

	Zátěž (kg)	16 – 36
	Nominální klopný moment (Nm)	25 – 110
	Hmotnost (kg)	(0,45 – 0,74) + (0,27 – 0,8)
	Elektrické kanály	16 – 19
	Výška (mm)	59,7 – 95,3
	Šířka (mm)	47,6 – 54

Dvojice mechanismů Gimatic [34] a Senvex pracují na principu tvarových kolíků, které jsou zamknuty pootočením prstence s kulisovými otvory. Tyto mechanismy jsou zaměnitelné a liší se v detailech.

	Zátěž (N)	150 – 2000
	Nominální klopný moment (Nm)	10 – 300
	Nominální krouticí moment (Nm)	20 – 600
	Průměr průchozího středu (mm)	4 – 50
	Hmotnost (kg)	(0,1 – 2,64) + (0,07 – 1,89)
	Elektrické kanály	15
	Průměr (mm)	50 – 200
	Šířka (mm)	34 – 55,7

Dva manuální mechanismy nabízí také firma Zimmer [35]. Menší modely do 20 kg se zamykají otočením středu. Modely pro 50 kg jsou na principu kuliček zapadajících do drážky.


	Zátěž (kg)	5 – 20
	Nominální klopný moment (Nm)	25 – 70
	Nominální krouticí moment (Nm)	30 – 80
	Hmotnost (kg)	(0,09 – 0,23) + (0,04 – 0,12)
	Elektrické kanály	4
	Průměr (mm)	40 – 63
	Šířka (mm)	37

	Zátěž (kg)	50
	Nominální klopný moment (Nm)	200 – 300
	Nominální krouticí moment (Nm)	200 – 300
	Hmotnost (kg)	(0,49 – 0,66) + (0,31 – 0,48)
	Elektrické kanály	4 – 9
	Průměr (mm)	80 – 100
	Šířka (mm)	45


1.7 Měření momentu

Pro zpětnovazebnou informaci o zatížení článku je vhodné do sestavy zařadit také momentový senzor snímající zatížení modulu krouticím momentem nebo také klopnými momenty podle počtu snímaných os. Pro použití v modulu je důležité, aby senzor měl minimální rozměry a hmotnost. Přináší to také několik komplikací. Výstupem momentových senzorů je velice slabý analogový signál, který musí být zesílen a následně převeden na digitální signál. Vedení signálu celým manipulátorem přes konektory spojovacích mechanismů a následné zpracování mimo manipulátor by mohlo způsobit rušení tohoto velice slabého signálu. Signál by měl proto být zpracován přímo v modulu, což znamená vestavění potřebné elektroniky a tím pádem nárůst hmotnosti i rozměrů.


Velkou škálu produktů má firma ATI industrial automation. Nabízí šestiosé měřicí zařízení pro měření sil a momentů. Hodnoty nominálních momentů jsou od 0,2 do 6000 Nm, kvůli hmotnosti je však největší použitelný senzor s hodnotou 120 Nm. Pro hodnotu 4 Nm je v tabulce uvedena i titanová verze s průměrem 27 mm. Pro vyšší momenty je nejmenší zařízení s nominálním momentem 400 Nm s hmotností 4,99 kg.

	Počet měřených os	6
	Nominální klopný moment (Nm)	4 – 120
	Nominální krouticí moment (Nm)	4 – 120
	Průměr průchozího středu (mm)	(-)6,3; 9,5
	Hmotnost (kg)	0,03 – 0,35
	Průměr (mm)	(27) 40 – 58
	Šířka (mm)	(18,2) 12,2 – 30


Firma Interface [36] nabízí jednoosý momentový senzor v ploché verzi v měřicím rozmezí 100 – 5000 Nm v třech velikostních řadách pro 100 Nm, 200 – 2000 Nm a 5000 Nm, v tabulce není zmíněn největší.

	Počet měřených os	1
	Nominální moment (Nm)	100, 200 – 2000
	Průměr průchozího středu (mm)	40,2; 41
	Průměr (mm)	100; 156
	Šířka (mm)	28; 43,5

Podobný senzor nabízí firma Scaime [37]. Rozsah měřených nominálních momentů je rozdělen do 5 rozměrů modelu. 50/100 Nm, 200 Nm a 500/1000 Nm jsou využitelné v této aplikaci.

	Počet měřených os	1
	Nominální moment (Nm)	50 – 1000
	Průměr průchozího středu (mm)	40 – 70
	Průměr (mm)	100 – 156
	Šířka (mm)	33 – 43,5

Pro menší momenty existují i zařízení s minimální šířkou, jako je model TS70 od firmy ME-systeme.

	Počet měřených os	1
	Nominální moment (Nm)	2; 5; 10
	Průměr průchozího středu (mm)	6
	Průměr (mm)	70
	Šířka (mm)	12

2 Požadavkový list

2.1 Obecné parametry

Kinematická struktura	angulární
Počet stupňů volnosti	volitelný 2 – 6
Spojení modulů	systém rychlé výměny
Řízení modulů	integrováno v modulu
Výkon modulů (minimální krouticí moment ze simulace)	výkonová řada (187 Nm, 91 Nm, 15 Nm)
Průchod kabeláže a hadic	napájení datová řídící linka
Nosnost při plném vyložení	10 kg
Mezní přetížení	50%
Poměr nosnost/hmotnost	1/2
Dosah	1000 mm
Rychlost koncového bodu	1 m.s^{-1}
Zrychlení koncového bodu	1 m.s^{-2}
Energie	elektrická
Zdroj energie	akumulátory 24 – 48 VDC
Prostředí	vnitřní / vnější

2.2 Parametry pohonného modulu

Rozsah rotace	360° (480° pro první rotaci)
Průchodnost kabeláže	Převodovka s dutou hřídelí + motor s dutou hřídelí + motor mimo osu převodovky
Propojení modulů	2 – 4 rychlospojovací příruby
Rozměry	Kompaktní Délka minimální daná délkou pohonu
Konstrukce modulu	Robustní, Nárazuvzdorná, Otřesu vzdorná Jednoduchý tvar pro snadnou manipulaci a skladování

- Řízení pohonu a vyhodnocení enkoderů a senzorů přímo v modulu.
- Vnější nosná konstrukce z lehkých materiálů – speciální slitiny hliníku.
- Použití ložiska se zkříženými válečky.

2.3 Parametry propojovacího modulu

Tvary	Přímý, zalomený L/S, vidlice
Průchodnost kabeláže	Kabeláž propojující příruby uvnitř modulu řádně upevněná.
Propojení modulů	2 rychlospojovací příruby

- Použití lehkých materiálů: speciální slitiny hliníku/kompozitní materiály.
- Tuhost pro udržení opakované přesnosti polohování.
- Různé délky pro vytvoření požadované kinematické struktury.

2.4 Parametry spojovací plochy

Přenos krouticího momentu	Dáno největším krouticím momentem
Průchodnost kabeláže	Konektory pro: 24 – 48 VDC (32 A) CAN datová sběrnice
Krytí/těsnění proti	Vodě, prachu, nečistotám IP64
Propojení modulů	Propojení pohonného a propojovacího nebo dvou propojovacích modulů.
Spojování modulů	Jednoduché, bez použití nástrojů (automatické)

- Tuhost pro udržení opakované přesnosti polohování.
- V rámci poka-yoke designu zvážit velikosti (speciální tvary) příruby, aby bylo zabráněno skládání sestav, kde by došlo k poškození.

3 Předběžná dynamická analýza

Cílem práce je navrhnout komplexní modulární systém manipulátoru. Důležité je tedy nejprve zhodnotit manipulátor jako celek, aby splňoval zadané požadavky. To znamená, aby při maximálním počtu stupňů volnosti (největší hmotnosti) a požadovaném dosahu, manipulátor splňoval zadanou nosnost.

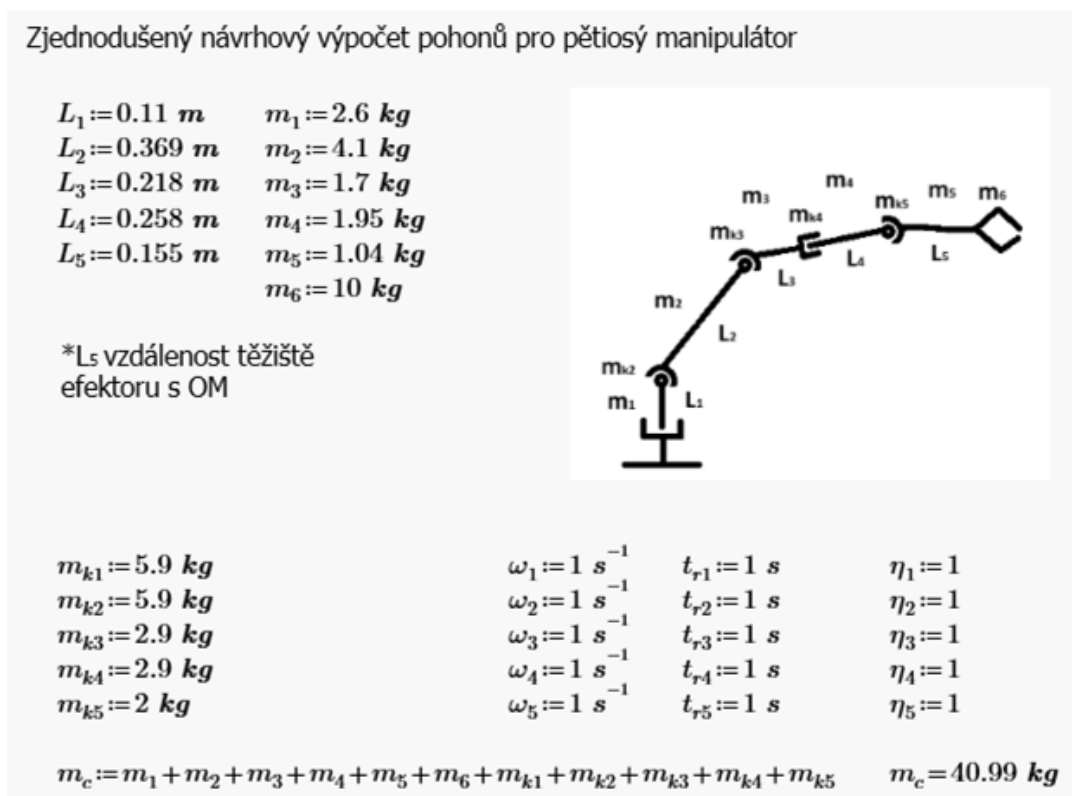
Pro přibližný první návrh výkonu pohonných sestav byl vypracován jednoduchý výpočtový model s možností konfigurace délek a hmotností jednotlivých kloubů pro modelovou sestavu s pěti stupni volnosti. Výpočet je velice zjednodušený. Pro detailní simulaci a kontrolu zatížení pohonů je třeba mít hotové 3D modely s nastavenou hmotností všech komponent. Pro první dimenzování modulů, 3D podklady nejsou k dispozici, a tak je potřeba přibližně odhadnout velikosti všech komponent modulu. Na základě odhadovaných hmotností a vzdáleností mezi klouby je vypočítán statický zatěžující moment. Dynamický zatěžující moment je těžší odhadnout, a tak je ve výpočtu uvažováno, že kloub vždy pohybuje tyčí a jsou zanedbány klopné momenty. Pohony jsou počítány od konce bližšího objektu manipulace, předchozí pohony jsou vždy zablokovány a nepočítá se s ovlivněním od předchozích kloubů. U kloubů s vertikálním zdvihem mohou být vypočítané hodnoty nižší, ale pro základní návrh je důležité znát přibližné oblasti hodnot.

V následujících podkapitolách bude uvedena analýza pohonu pro druhou osu rotace, tedy nejvíce namáhaný modul umožňující vertikální zdvih ramene. Ruční výpočet je porovnán s analýzami průběhu pohybu vytvořených v simulačních programech SolidWorks a Creo.

Pro přibližný odhad hmotnosti kloubů je potřeba sečíst jednotlivé hmotnosti komponent zařazených do pohonné sestavy modulu. Je tedy třeba uvažovat s motorem, převodovkou, brzdou, enkodérem, řídicí elektronikou motoru, spojovacím mechanismem, měřicím zařízením a jeho elektronikou, ložisky, rámem modulu a jeho krytováním. Je tedy zřejmé, že musí být použity lehké komponenty a rám je třeba optimalizovat a navrhnout z lehkých materiálů, jako je hliník nebo kompozitní materiály.

3.1 Ruční výpočet

Pro základní odhad k návrhu výkonu pohonu byl nejprve v prostředí Mathcad vytvořen předběžný výpočet. Zadání vychází z modelové situace manipulátoru s pěti stupni volnosti. Délky a hmotnosti byly sjednoceny s vytvořeným 3D modelem. Vzdálenosti $L_1 - L_4$ jsou vzdálenosti rotačních os. L_5 je vzdálenost těžiště objektu manipulace od poslední rotační osy. Hmotnosti pohonných modulů byly odhadnuty na 7kg pro první dvě osy rotace, 4 kg pro druhé dvě osy rotace a 2,5 kg pro rotaci pátou. Pro výpočet byly hmotnosti rozděleny na hmotnosti kloubů s označením m_{k1-5} a hmotnosti ramen s pohyblivými částmi kloubu označené jako m_{1-5} . Hmotnost m_6 je efektor s objektem manipulace. Celková hmotnost sestavy s nosností dle požadavkového listu vychází na necelých 41 kilogramů.



Obr. 3.1 Zadání pro výpočet v prostředí Mathcad

Výpočtový model má vstupní hodnoty úhlové rychlosti kloubu, čas rozběhu a účinnost pohonu, která pro srovnání se simulací je nastavena na 100%.

Kloub číslo 2 umožňuje zvedání celého ramene. Hodnoty pro výpočet tedy musí splňovat podmínky zadané v požadavkovém listu. Ze zadaných parametrů vychází délka ramene 1 m, rychlost koncového bodu $1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ a zrychlení $1\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$.

Statický zátěžný moment je vypočítán ze síly působící při daném zrychlení v těžišti ramene. Těžiště je vypočítáno rekurentním vzorcem z těžiště ramene otáčeného kloubem číslo 3, dále hmotností třetího kloubu a ramene mezi druhým a třetím kloubem. Jelikož jsou do ramene zahrnuty i rotační hmoty druhého kloubu, není těžiště odhadováno uprostřed, ale v jedné třetině délky.

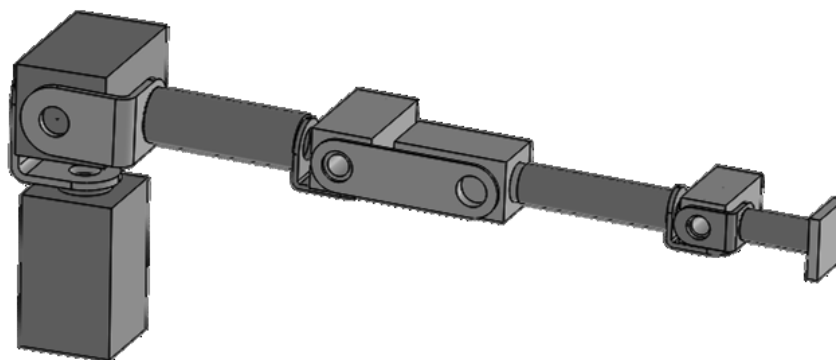
Pro dynamický moment je odhadnut moment setrvačnosti. Zde se může vyskytnout vysoká nepřesnost, protože je rameno zjednodušeno na tyč s osou rotace na konci. Součtem momentu statického a dynamického vychází celkový moment, který musí pohon vyvinout.

$\varepsilon_2 := \frac{\omega_2}{t_{r2}}$	$\varepsilon_2 = 1 \text{ s}^{-2}$	$L_{OM} := L_2 + L_3 + L_4 + L_5$	$L_{OM} = 1 \text{ m}$	Délka ramene
$v_{OM} := \omega_2 \cdot L_{OM}$	$v_{OM} = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$a_{OM} := \varepsilon_2 \cdot L_{OM}$	$a_{OM} = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$	Rychlost a zrychlení OM
$m_{26} := m_2 + m_{k3} + m_3 + m_{k4} + m_4 + m_{k5} + m_5 + m_6$	$m_{26} = 26.59 \text{ kg}$			Hmotnost ramene
$x_2 := \frac{L_2 \cdot \left(m_{k3} + \frac{m_2}{3}\right) + (L_2 + x_3) \cdot m_{36}}{m_{26}}$	$x_2 = 0.665 \text{ m}$			Vzdálenost těžiště od osy rotace
$a_2 := \varepsilon_2 \cdot x_2$	$a_2 = 0.665 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$			Zrychlení v těžišti
$T_{S2} := m_{26} \cdot (g + a_2) \cdot x_2$	$T_{S2} = 185.126 \text{ N} \cdot \text{m}$			Statický moment
$J_2 := \frac{m_{26} \cdot (L_2 + L_3 + L_4 + L_5)^2}{3}$	$J_2 = 8.863 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$			Moment setrvačnosti
$T_{D2} := J_2 \cdot \varepsilon_2$	$T_{D2} = 8.863 \text{ N} \cdot \text{m}$			Dynamický moment
$T_2 := \frac{T_{S2} + T_{D2}}{\eta_2}$	$T_2 = 193.99 \text{ N} \cdot \text{m}$			Celkový moment pohonu

Obr. 3.2 Výpočet momentu pro druhý pohon v prostředí Mathcad

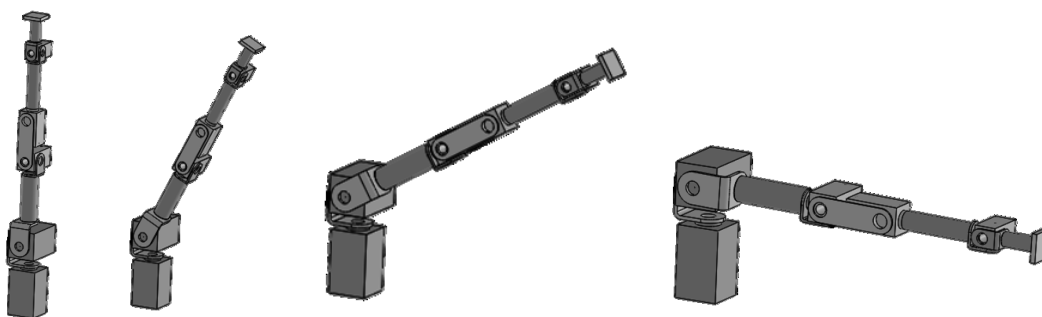
3.2 Analýza v systému SolidWorks

Pro pohybovou analýzu byl vytvořen zjednodušený 3D model manipulátoru s pěti stupni volnosti. Klouby jsou reprezentovány kvádry, které jsou spojeny propojovacími moduly podobně, jak by tomu mohlo být u výsledného manipulátoru. Hmotnosti a rozměry se shodují s ručním výpočtem.



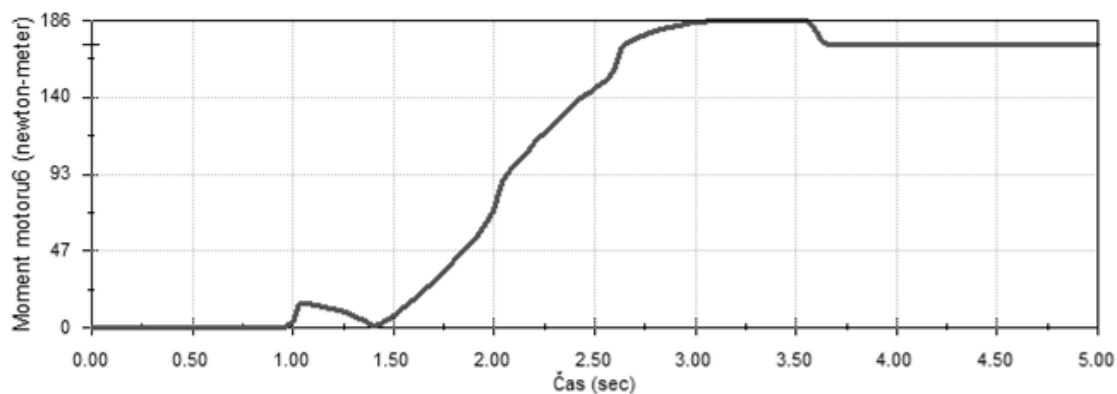
Obr. 3.3 Zjednodušený model manipulátoru

Pro simulaci byly pohony ramene zablokovány až na pohon v druhém kloubu, do toho byl vsazen pohon s předpisem pohybu. Pohon je nejvíce namáhán, pokud brzdí nebo se rozjíždí z vodorovné polohy. V analýze se manipulátor podle rampového předpisu rozjede úhlovým zrychlením 1 s^{-2} z vertikální polohy, pohybuje se rychlostí 1 s^{-1} a následně stejným zrychlením dobrzdí do horizontální polohy.



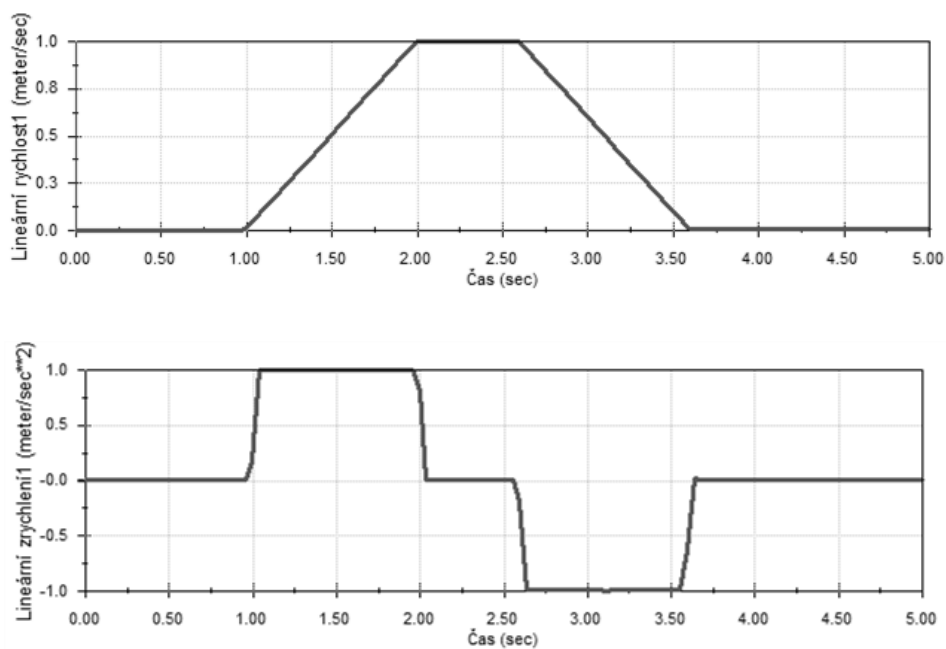
Obr. 3.4 Průběh pohybové analýzy

Výsledkem analýzy je průběh momentu zatěžujícího pohon kloubu. Maximální hodnota je 186 Nm. V grafu jde vidět v čase 1 s rozjezdové zatížení motoru, moment roste až do maximální hodnoty a po zastavení pohon drží rameno momentem 172 Nm.



Obr. 3.5 Průběh momentu na pohonu

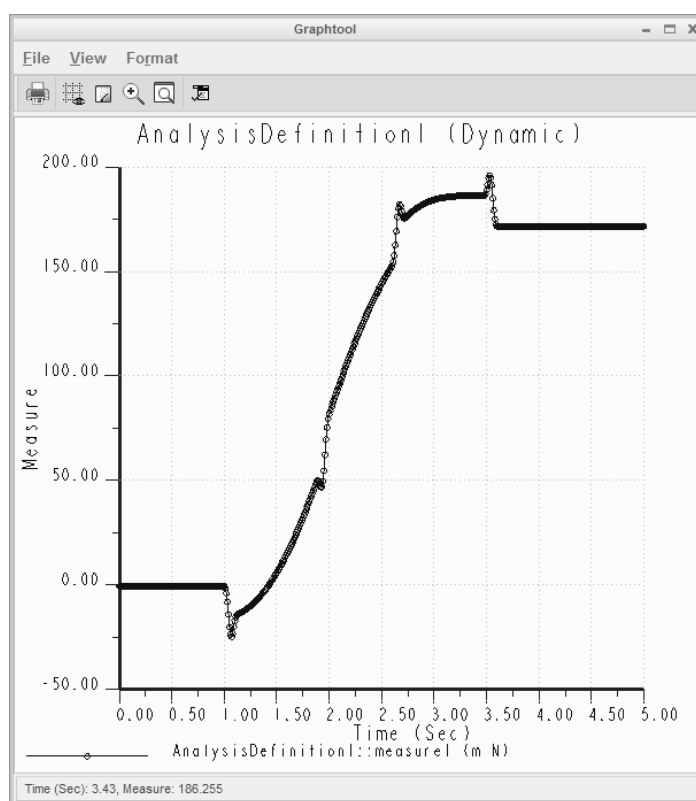
Pro kontrolu předpisu pohonu je v grafech znázorněna rychlost a zrychlení koncového bodu.



Obr. 3.6 Rychlost a zrychlení koncového bodu

3.3 Analýza v systému Creo

Do systému Creo byl 3D model přeimportován, nastaveny materiály, od kterých se odvíjí hmotnosti článků a zavazben. Všechny pohony kromě měřeného kloubu byly zastaveny pomocí servomotorů držících polohu. Do kloubu č.2 byl vsazen servomotor s předpisem rychlosti. Analýza neumožnila interpolaci pouze z hraničních bodů, jako tomu bylo v SolidWorks, tak byly přidány další body průběhu, i tak se nepodařilo pokrýt všechny špičky, které jsou dány interpolací, která v přechodových bodech není vyhlazena. Je dobré je tedy zanedbat. Maximální hodnota ve špičce je 196 Nm, ale správně vypočítaná hodnota v oblasti požadovaného průběhu je 186.3 Nm. Po zastavení motor drží rameno momentem 171.6 Nm.



Obr. 3.7 Průběh momentu ze systému Creo

V grafu je znázorněn moment, kterým působí manipulátor na analyzovaný kloub. V tomto případě, oproti grafu ze systému SolidWorks, kde je vyobrazena absolutní hodnota zátěžného momentu působícího na pohon, je to potřebný brzdňý moment. Nejprve je rameno "roztlačeno" proti směru brzdňého momentu, následně moment stoupá až do úplného zastavení manipulátoru. Po zastavení není moment nulový, protože na rameno ve vodorovném natočení působí gravitace a pohon, potažmo brzda drží jeho polohu.

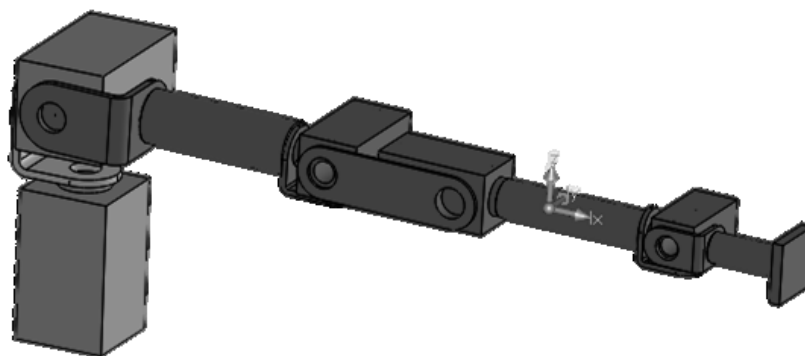
3.4 Porovnání výpočtů

Z hodnot všech tří analýz jde vidět, že ruční výpočet nese chybu značným zjednodušením. Výsledky pohybových analýz v 3D systémech vracejí téměř stejné hodnoty. Rozdíly jsou dány hlavně rozlišnou interpolací předpisu pohonu a rozdílným zaokrouhlováním.

Tab. 3.1 Porovnání výpočtů

	Ruční výpočet	SolidWorks	Creo
Vzdálenost těžiště	665 mm	658 mm	658 mm
Hmotnost	26,59 kg	26,59 kg	26,59 kg
Moment setrvačnosti	8,86 kg.m ²	14,58 kg.m ²	14,58 kg.m ²
Zátěžný moment	194 Nm	186 Nm	186.3 Nm

Z výsledků je zřejmé, že na nejvíce namáhaný kloub musí být použit pohon, který dokáže vyvinout krouticí moment okolo 190 Nm pro pohyb ramene s předepsanými parametry.



Obr. 3.8 Poloha těžiště ramene

4 Návrh variant řešení

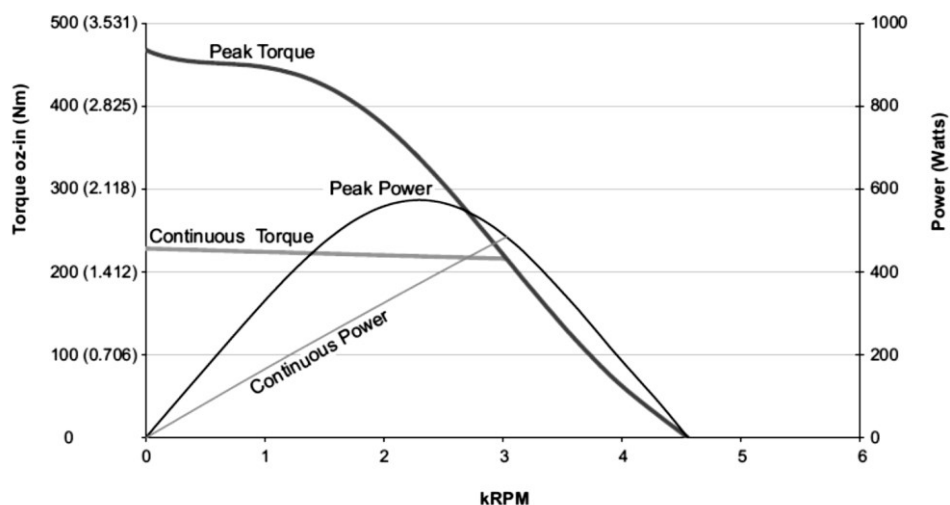
4.1 Výběr komponent

Firma Animatics nabízí řadu elektromotorů SmartMotor. Výhodou těchto pohonů je, že sestavu pohonu tvoří elektromotor, enkodér, brzda a také řídicí jednotka. Vše je tedy součástí a není nutné přidávat další zařízení. Řídicí jednotka podporuje komunikaci po sběrnici CAN, což je plánovaná komunikační sběrnice pro modulární manipulátor.



Obr. 4.1 Pohonná jednotka Animatics

Pohonná jednotka je také v několika výkonových řadách, což umožní návrh několika výkonově odlišných modulů. Pro nejsilnější modul je vybrán model SM34165DT s výkonem 615W při napájení 48V stejnosměrného napětí. Při napájení 42V může pracovat při výkonu 500W.



Obr. 4.2 Momentová charakteristika motoru při napájení 42V

Pro zjištění potřebného krouticího momentu byla vypracována dynamická analýza na zjednodušeném modelu manipulátoru. Zde bylo zjištěno, že pro požadovanou kinematickou strukturu a rychlost na konci ramene 1m/s, musí mít při použití převodovky s převodovým poměrem 1:160 a dodatečného převodu 1:1,5, dohromady tedy 1:240, pohon otáčky 2300 ot/min. Zde se vyloučilo napájení 24V stejnosměrného napětí a je třeba zajistit napájení 42 nebo 48V. Při napájení 42V je při 2300 ot/min deklarovaný moment 1.45Nm.

Harmonická převodovka je zvolena od firmy Harmonic Drive. Model SHD-2SH je lehký, má malé zástavbové rozměry a velký otvor pro dutou hřídel. Několik velikostních řad dovolí nakonfigurovat model podle potřeby přenášeného krouticího momentu.



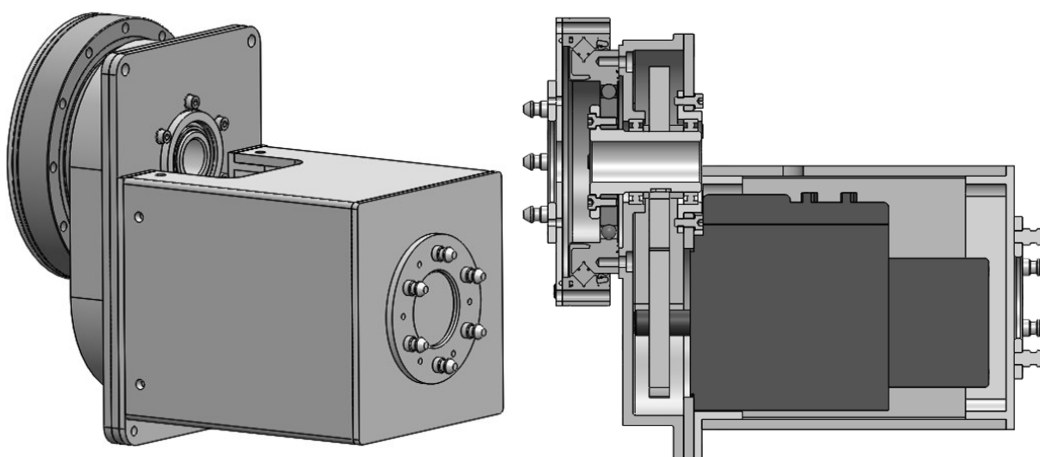
Obr. 4.3 Harmonická převodovka

Pro největší modul je vybrána převodovka SHD-32-2SH s převodovým poměrem 160:1. Maximální vstupní otáčky převodovky jsou 4800 ot/min a průměrný zátěžný moment 151 Nm opakovatelný špičkový moment je 261 Nm a špičkový moment 445 Nm. Průměr převodovky je 142 mm a její délka 27.9 mm.

4.2 Koncepty konstrukcí

V průběhu návrhu variant bylo navrženo 10 konstrukčních koncepcí. Na koncepcích byly testovány různé způsoby zajištění průchodu kabeláže pohonným modulem a také konstrukce nosného rámu modulu. Při návrhu byly využívány běžně dostupné komponenty a materiály. Konstrukce jsou navrženy i s ohledem na jejich výrobu a montáž. Pro výrobu je uvažováno standartních metod třískového obrábění a využití 3D tisku.

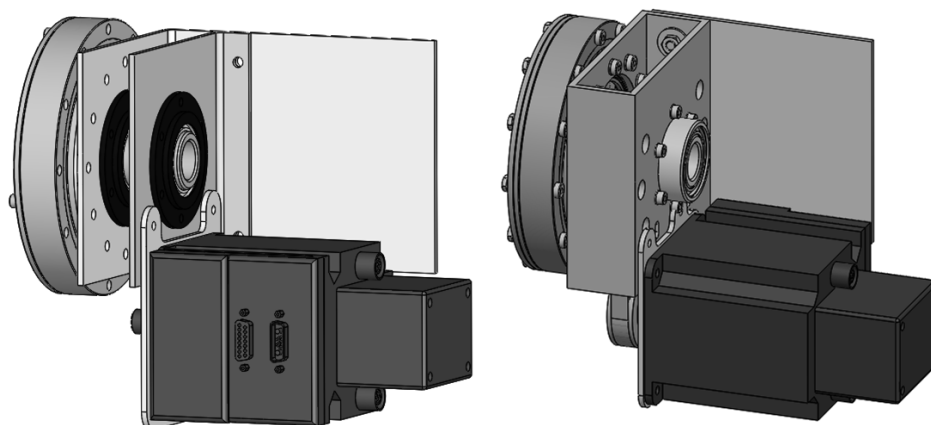
Jedna z prvních koncepcí pohonného modulu využívá pro přenos krouticího momentu z pohonné jednotky na vyosenou harmonickou převodovku čelní ozubené soukolí s přímými zuby. Převod je uložen ve frézované skříni z hliníkové slitiny, která je uzavřena víkem. Ozubený převod s převodovkou je spojen dutou ocelovou hřídelí. Ta je uložena v ložiscích na obou stranách skříně.



Obr. 4.4 Koncept s čelním ozubením

Pohonná jednotka je zakrytována hliníkovou trubkou čtvercového průřezu. Koncové víko nese jednu spojovací přírubu, druhou nese kryt harmonické převodovky. Nevýhodou této koncepce je použití ozubení, což znamená mazání, vymezení vůlí a hlučnost. Dalšími problémy jsou velká vzdálenost přírub a s tím spojené vysoké namáhání materiálu. Problematické může být vystředění otvorů pro průchozí hřídel vstupující do převodovky.

Dalšími návrhy jsou montované konstrukce. Hlavní nosný rám je smontován ze standartních profilů. Jedna varianta počítá s použitím ocelových L profilů. Nevýhodou této koncepce mohou být nepřesnosti a nedokonalá souosost děr pro průchozí hřídel, také nedostatečná tuhost. Výhodou je přiblížení přírub blíže k sobě na plech kolmý k převodovce a použití jednoduchých profilů bez nutnosti frézování, což vede k vysoké úspoře nákladů na výrobu. U těchto variant by bylo potřeba konstrukci vyztužit vzpěrami a to by mohlo vést ke komplikaci a zvýšení hmotnosti modulu.

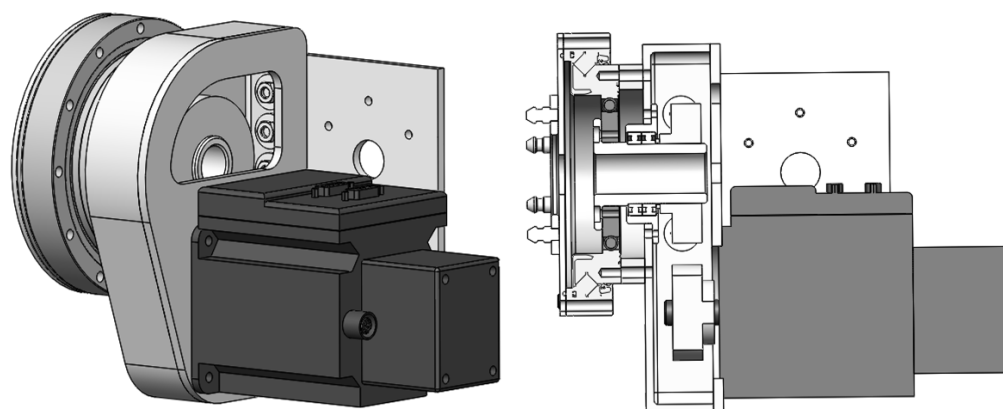


Obr. 4.5 Montované koncepty

Následující koncept (Obr.4.5 vpravo) je složen z hliníkového profilu obdélníkového průřezu a k němu přimontovaného ocelového plechu. Tuhost tohoto řešení je vyšší, ale mohla by být obtížná smontovatelnost některých prvků modulu. Pro přenos krouticího momentu je použit řemenový převod ozubeným řemenem, ten zajistí synchronní chod. Řemenový převod je tichý a není potřeba mazání jako u ozubení. Nevýhodou řemene je nutnost počítat s jeho vypnutím pro správné plnění své funkce. Napnutí může být docíleno napínacím mechanismem ve formě napínací kladky nebo možností změny osové vzdálenosti přírub. Ozubené řemeny nemusí být předepínány jako je tomu u klínových řemenů, stačilo by tedy pouze navrhnout potřebnou osovou vzdálenost a umožnit nasazení řemene při montáži.

Ložiska dutého hřídele jsou obě umístěna na stěně profilu, ke které je přimontován pohon modulu. Je zde tak pouze jeden ložiskový domek.

Posledním konceptem s rovnoběžnými osami převodovky a pohonu je kombinace frézované hliníkové skříně a přimontovaného plechu. Tento koncept opět používá řemenového převodu pro přenos krouticího momentu. Dutý hřídel propojující řemenici a vstup převodovky je uložen v jednom ložiskovém domku se dvěma ložisky. Domek je umístěn na stěnu, ke které je přimontována převodovka.



Obr. 4.6 Koncept s frézovanou skříní a plechem

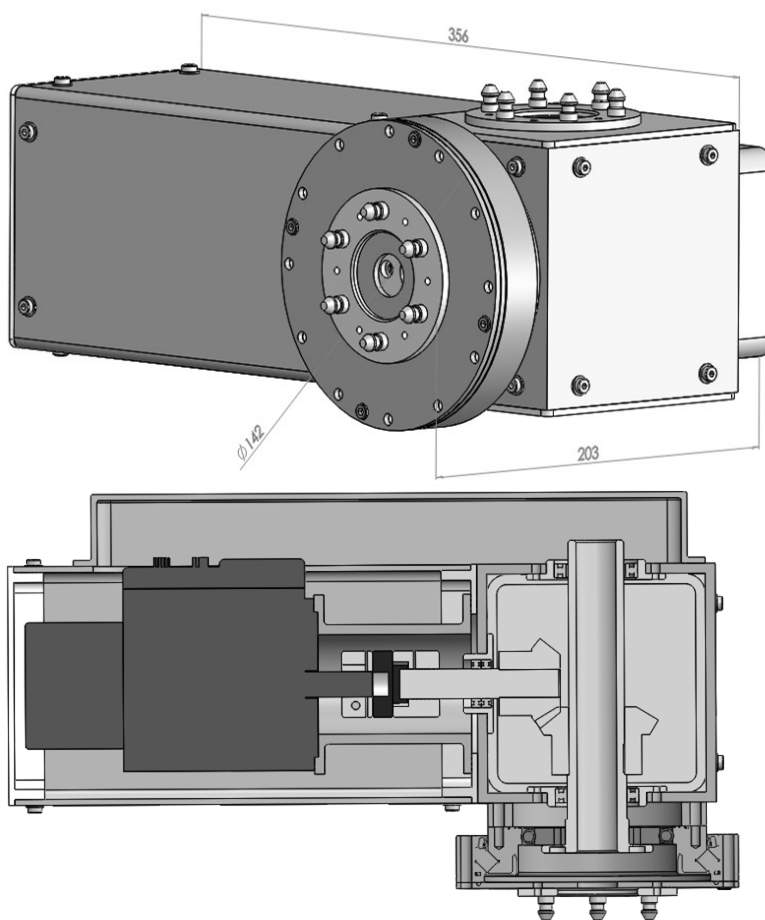
Další koncepce mají jinak zajištěnou průchodnost kabeláže například použitím kuželového soukolí je osa převodovky kolmá na osu pohonu. Návrhy s neprůchozí převodovkou uvažují se vstupem kabeláže až za převodovkou. Z koncepcí byly vytvořeny tři různé varianty pohonného modulu. Navržené varianty budou porovnány kritériální analýzou. Varianta nejlépe splňující stanovené požadavky bude rozpracována.

Tab. 4.1 Morfologická matice možností

Průchodnost kabeláže	Dutá hřídel motoru a převodovky	Motor mimo osu převodovky, dutá hřídel převodovky	Alternativní řešení bez průchozí hřídele
Použitý převod	Čelní ozubení	Kuželové ozubení	Řemen
Konstrukce modulu	Frézovaná skřín	Uzavřený profil	Montovaná konstrukce
Poloha spojovacích přírub	Osy přírub na sebe kolmé	Osy přírub rovnoběžné	
Vymezení vůlí převodu	Posuv motoru	Napínací kladka	Umožnění při montáži

4.3 Varianta A

Hlavní nosný prvek varianty je hliníková trubka čtvercového průřezu. Z jedné strany je přimontována harmonická převodovka s průchozím středem. Na výstupním dílu převodovky je přimontován kryt z ocelového plechu, na kterém je umístěna příruba pro připojení propojovacího modulu. Pohonná jednotka je připojena přes distanční prvek, kde je umístěna spojka Oldham, ke straně profilu kolmo k převodovce. Přenos krouticího momentu je realizován kuželovým soukolím s převodovým poměrem 1:1,5. Hlavní profil je uzavřen víky, kde je umístěna druhá příruba pro připojení propojovacího modulu.



Obr. 4.7 Varianta s kuželovým soukolím

Na výstupní hřídel motoru je přes spojku připojen hřídel, který je uložen ve dvou ložiscích umístěných v jednom domku. Na hřídel je nasazen pastorek ozubeného soukolí. Kolo je nasazeno na průchozí hřídel připojenou na vstup harmonické převodovky. Hřídel je uložen ve dvojici ložisek umístěných na protilehlých stranách hlavního profilu.

Na straně, kde je připojen pohon, je lem, na kterém je upevněn kryt ve formě hliníkové trubky čtvercového průřezu. Profil je uzavřen víkem, které není namáháno, může být tedy z hliníku nebo plastu. Kabeláž vystupující z průchozí hřídele je vedena pod krytem k pohonu.

Výhodou varianty je vysoká tuhost. Všechny prvky vnášející namáhání do systému se nacházejí na jediném profilu. Další kladnou vlastností je použití standardních dostupných profilů, což významně sníží náklady.

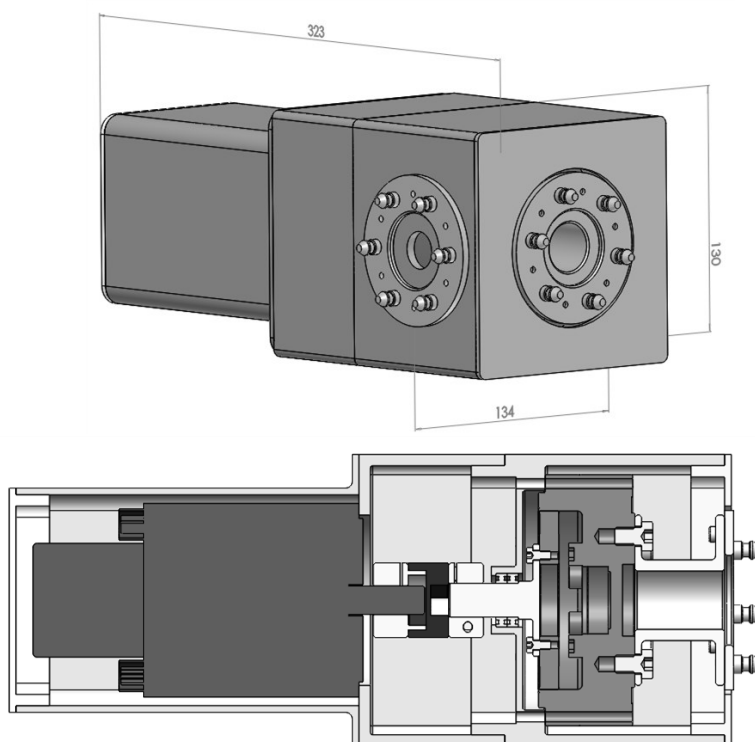


Obr. 4.8 Kuželové soukolí

Nevýhody varianty vycházejí z použití ozubení. Ozubení je potřeba mazat a olejová lázeň znamená dokonalé utěsnění prostoru s ozubením. Ozubení je ocelové a má tedy vyšší hmotnost. Zubová vůle by mohla zapříčinit značnou nepřesnost a odchylku od dat z enkodéru na motoru. Do sestavy by musel být zařazen ještě jeden snímač polohy. Ozubení je citlivé na přesnost uložení, jinak mohou vznikat nepříznivé vibrace a hluk.

4.4 Varianta B

Alternativou průchozího středu převodovky je vstup kabeláže až za převodovkou. Namáhané prvky jsou opět připojeny na jeden nosný profil. Je to frézovaný díl z hliníkového profilu čtvercového průřezu. Dno profilu nese převodovku, která má menší průměr než průchozí převodovky. Na stejné stěně je také ložiskový domek hřídele přenášejícího krouticí moment mezi převodovkou a spojkou. Na výstupu převodovky je přimontován buben. Na buben se navíjí kabeláž, která do něj prostupuje. Na druhém konci bubnu je příruba pro připojení propojovacího modulu. Na nosný profil navazuje opět frézovaný profil, který vymezuje prostor pro umístění spojky. Ke dnu je přimontována pohonná jednotka.

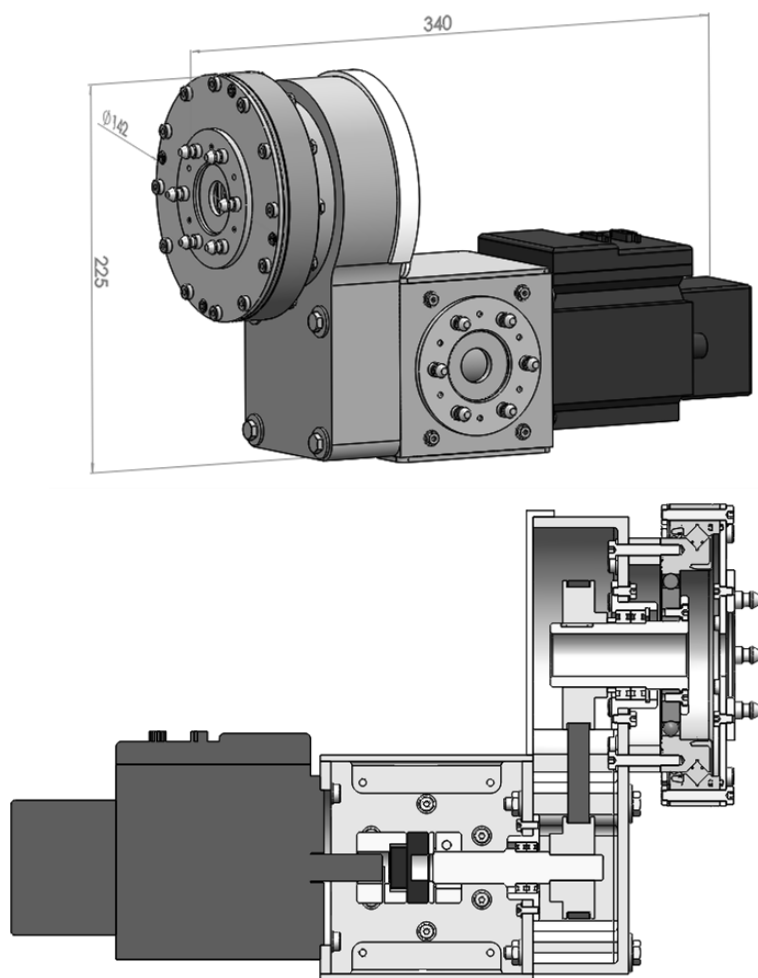


Obr. 4.9 Varianta s neprůchozí převodovkou

Výhodou varianty je jednoduchost, kompaktní rozměry a nepřítomnost převodu snižujícího účinnost. Nevýhodou je omezená rotace zapříčiněná navíjením kabeláže na buben. Výstup bubnu z modulu by mohl být složitý na krytování. Komplikace by mohly vzniknout i při složitém frézování nosného dílu. Neprůchozí převodovka má sice menší průměr, zato má výrazně vyšší hmotnost.

4.5 Varianta C

Třetí varianta má osu převodovky posunutou od osy pohonu. Krouticí moment je přenášen ozubeným řemenem. Hlavní rám se skládá ze dvou hliníkových dílů, které jsou spolu smontovány. Větší díl je frézovaný a nese převodovku, zároveň kryje řemenový převod. Harmonická převodovka je přimontována přes distanční trubku. Hřídel spojující převodovku s řemenicí je uložen ve dvojici ložisek upevněných v ložiskovém domku. Druhý díl hlavního rámu je vyroben z hliníkové trubky čtvercového průřezu. V tomto dílu je umístěna spojka Oldham. Na zadní část je přimontován motor, zepředu pak vystupuje hřídel uložený ve dvojici ložisek. Hřídel přenáší krouticí moment od spojky do řemenice. Řemenice mají počty zubů v poměru 1:1,5. Spojovací příruby se nacházejí na výstupu převodovky a na boční straně dílu, ve kterém je umístěna spojka.



Obr. 4.10 Varianta s řemenovým převodem

5 Porovnání variant řešení

Pro porovnání variant byla použita kritériální analýza. Analýza posuzuje navržené varianty podle zvolených kritérií. Bylo zvoleno šest důležitých kritérií pro posouzení navržených variant. V tabulce jsou uvedena jednotlivá kritéria a popis pro variantu A, tedy modul s kuželovým soukolím, variantu B s neprůchozí převodovkou a variantu C s řemenovým převodem.

Tab. 5.1 Stanovení kritérií pro výběr optimální varianty

označení	kritérium	popis	A	B	C
K1	Rozměry modulu	Vnější rozměry modulu	367x203x142	323x134x130	340x225x142
K2	Složitost konstrukce	Náročnost výroby a montáže	Standardní profily	Frézování větší hloubky	Frézování složitých tvarů
K3	Bezvůlovost	Synchronní chod pohonu a výstupní příruby	Ozubení	Bezvůlový	Synchronní řemen
K4	Náročnost údržby	Opotřebování součástí a nutnost kontroly	Ozubení, olej	Navíjený kabel	Řemen
K5	Hmotnost	Hmotnost modulu (bez krytu)	9 kg	8,5 kg	7 kg
K6	Možnost úprav	Optimalizace rozměrů, rozsah rotace	Velikost ozubení	Omezený rozsah	Velikost řemenic

První kritérium je velice důležité, jelikož se jedná o modulární zařízení a je potřeba docílit co nejkompaktnějších rozměrů. Pohonné moduly by neměly vyčnívat do prostoru, aby neomezovaly rozsah pohybu manipulátoru. Každá hmotnost vzdálenější od hlavních os manipulátoru může způsobovat nežádoucí deviační momenty. Rozměry jsou také důležité pro transport a skladování.

Kritérium K2 má nejvyšší vliv na náklady na výrobu manipulátoru. V kritériu je hodnocen podíl použití standardních profilů, které je možné koupit a výroby speciálních dílů. Posuzuje také složitost konstrukce a snadná dostupnost při montáži.

Bezvůlovost označená jako K3 je faktorem ovlivňujícím přesnost polohování koncového bodu manipulátoru. Některé prvky mohou do systému vnášet vůle. Vůle mohou zapříčinit také hlučnost, vibrace a opotřebení.

Náročnost údržby, což je čtvrtý hodnocený faktor posuzuje použití takových konstrukčních prvků v řešení, které mohou vykazovat rychlejší opotřebení a je třeba je pravidelně kontrolovat. Posuzováno je i použití mazacích prostředků a snadnosti jejich výměny/doplnění.

K5 představuje hmotnost, další z klíčových faktorů systému. Od hmotnosti se odvíjí potřebný výkon modulů a dynamické charakteristiky systému. Hmotnosti jsou porovnávány v podobném stádiu zpracování variant.

Posledním hodnoceným kritériem je možnost úprav modulu. Z různých situací nasazení manipulátoru vyplynou požadavky na úpravu modulu. Toto kritérium hodnotí možnosti úpravy rozsahu rotace a optimalizace konstrukce modulu.

Kritéria nabývají hodnot 1 až 6, podle toho jak odpovídá varianta danému faktoru. Významnost kritérií je posuzována na stupnici od 1 do 2. Pro určení významnosti byla použita metoda porovnávání v trojúhelníku párů.

Tab. 5.2 Úroveň kritéria

úroveň kritéria	
Vysoká	6
Dobrá	5
Průměrná	4
Nízká	3
Nepříznivá	2
Nevyhovující stav	1

Tab. 5.3 Významnost kritéria

významnost	
nejvyšší	2
nejnižší	1

V následující tabulce (6.4) jsou varianty ohodnoceny podle toho, jak splňují jednotlivá kritéria. Hodnocení vychází z podmínek stanovených v požadavkovém listu.

Tab. 5.4 Hodnocení variant

kritérium	A	B	C
K1	3	6	5
K2	6	4	4
K3	3	6	5
K4	3	6	6
K5	2	4	6
K6	4	2	6

Posouzení významnosti kritérií je provedeno metodou porovnání v trojúhelníku párů. Toto hodnocení bylo provedeno třemi hodnotiteli – autorem práce a kolegy Jakubem Melčákem a Markem Šostokem. Podle počtu voleb je z grafu (Obr. 5.1) určena významnost kritéria.

Tab. 5.5 Hodnocení kritérií autorem práce

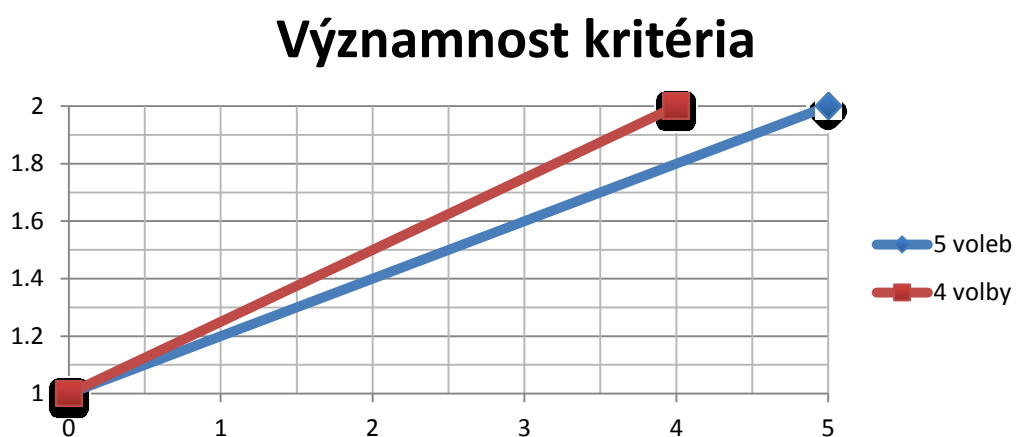
porovnání kritérií					počet voleb	významnost q_1
K1	K1	K1	K1	K1	3	1,6
K2	K3	K4	K5	K6		
	K2	K2	K2	K2	0,5	1,1
	K3	K4	K5	K6		
		K3	K3	K3	2,5	1,5
		K4	K5	K6		
			K4	K4	0,5	1,1
			K5	K6		
				K5	5	2
				K6	3,5	1,7

Tab. 5.6 Hodnocení kolegou Jakubem Melčákem

porovnání kritérií					počet voleb	významnost q_2
K1	K1	K1	K1	K1	2,5	1,65
K2	K3	K4	K5	K6		
	K2	K2	K2	K2	3,5	1,9
	K3	K4	K5	K6		
		K3	K3	K3	1,5	1,4
		K4	K5	K6		
			K4	K4	1	1,25
			K5	K6		
				K5	4	2
				K6	2,5	1,65

Tab. 5.7 Hodnocení kolegou Markem Šostokem

porovnání kritérií					počet voleb	významnost q_3
K1	K1	K1	K1	K1	2	1,5
K2	K3	K4	K5	K6		
	K2	K2	K2	K2	3	1,75
	K3	K4	K5	K6		
		K3	K3	K3	4	2
		K4	K5	K6		
			K4	K4	0	0
			K5	K6		
				K5	2	1,5
				K6	4	2



Obr. 5.1 Graf pro stanovení významnosti kritéria

Porovnáním kritérií a stanovením jejich významnosti z grafu může být stanovena výsledná vážená úroveň kritéria. V závěrečném zhodnocení jsou zprůměrovány hodnoty významností kritérií od tří hodnotitelů a přepočten výsledný vážený index, na jehož základě je vybrána vítězná optimální varianta.

Tab. 5.8 Vážený index varianty A

kritérium	úroveň	q ₁	q ₂	q ₃	q	vážený index
K1	3	1,6	1,65	1,5	1,58	4,74
K2	6	1,1	1,9	1,75	1,58	9,48
K3	3	1,5	1,4	2	1,63	4,89
K4	3	1,1	1,25	0	0,78	2,34
K5	2	2	2	1,5	1,83	3,66
K6	4	1,7	1,65	2	1,78	7,12
					celkem	32,23

Tab. 5.9 Vážený index varianty B

kritérium	úroveň	q ₁	q ₂	q ₃	q	vážený index
K1	6	1,6	1,65	1,5	1,58	9,48
K2	4	1,1	1,9	1,75	1,58	6,32
K3	6	1,5	1,4	2	1,63	9,78
K4	6	1,1	1,25	0	0,78	4,68
K5	4	2	2	1,5	1,83	7,32
K6	2	1,7	1,65	2	1,78	3,56
					celkem	41,14

Tab. 5.10 Vážený index varianty C

kritérium	úroveň	q ₁	q ₂	q ₃	q	vážený index
K1	5	1,6	1,65	1,5	1,58	7,9
K2	4	1,1	1,9	1,75	1,58	6,32
K3	5	1,5	1,4	2	1,63	8,15
K4	6	1,1	1,25	0	0,78	4,68
K5	6	2	2	1,5	1,83	10,98
K6	6	1,7	1,65	2	1,78	10,68
					celkem	48,71

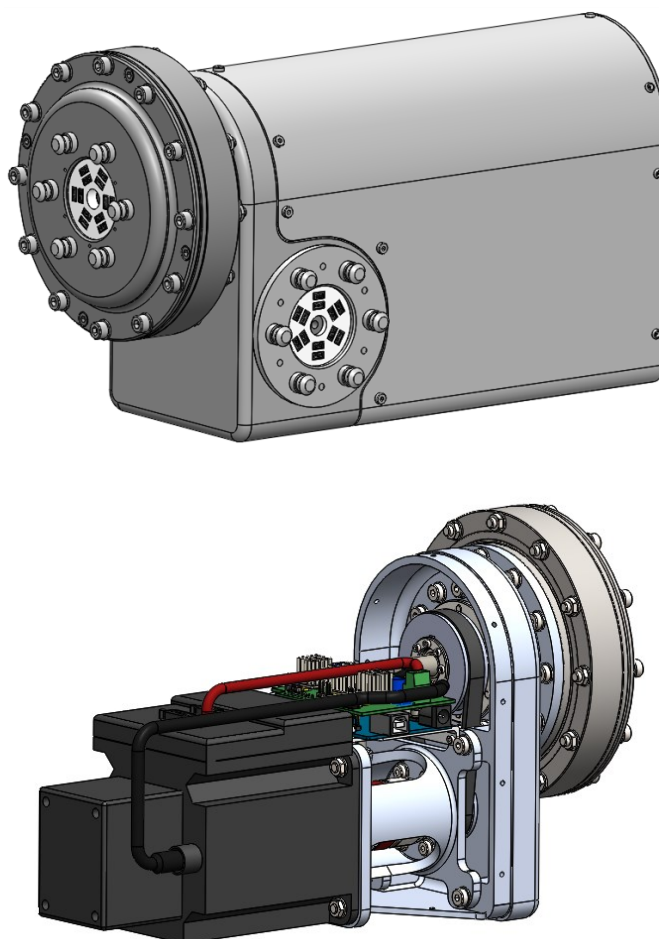
Z kritériální analýzy vyplývá, že optimální variantou pro rozpracování je varianta C s řemenovým převodem. Tato varianta byla tedy vybrána a podrobně vypracována.

6 Vypracování vybrané varianty

6.1 Pohonný modul

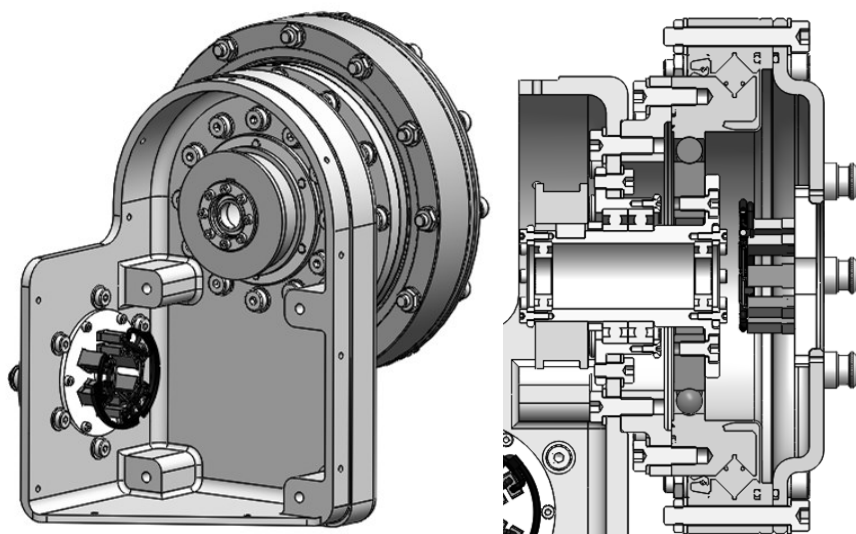
Pohonný modul zajišťuje pohyb manipulátoru. Rotační pohyb ramene je vykonán elektromotorem s převodovkou, která má vysoký převodový poměr. Důležitou podmínkou pohonného modulu, od které se odvíjí i konstrukce modulu je průchodnost kabeláže modulem. Znamená to použití průchozího hřídele. Konstrukce modulu musí mít nízkou hmotnost a kompaktní rozměry.

Modul má dvě základní komponenty – pohonnou jednotku Animatics a harmonickou převodovku Harmonic Drive. Pro tyto dvě komponenty je navržen rám, který jim vymezí určenou polohu. Tento rám přenáší veškeré silové působení v modulu. Vnější kryt je potom navržen pouze z tenkého ocelového plechu. Modul má dvě příruby umožňující napojení propojovacích modulů, a tím vytvoření požadované kinematické struktury.



Obr. 6.1 Pohonný modul

Hlavní nosný rám je z důvodu co nejnižší hmotnosti navržen z hliníkové slitiny. Pro výrobu prototypu je design přizpůsoben, aby mohl být vyroben technologií frézování. Po optimalizaci se počítá s odléváním tohoto největšího a nejvíce namáhaného dílu modulu.



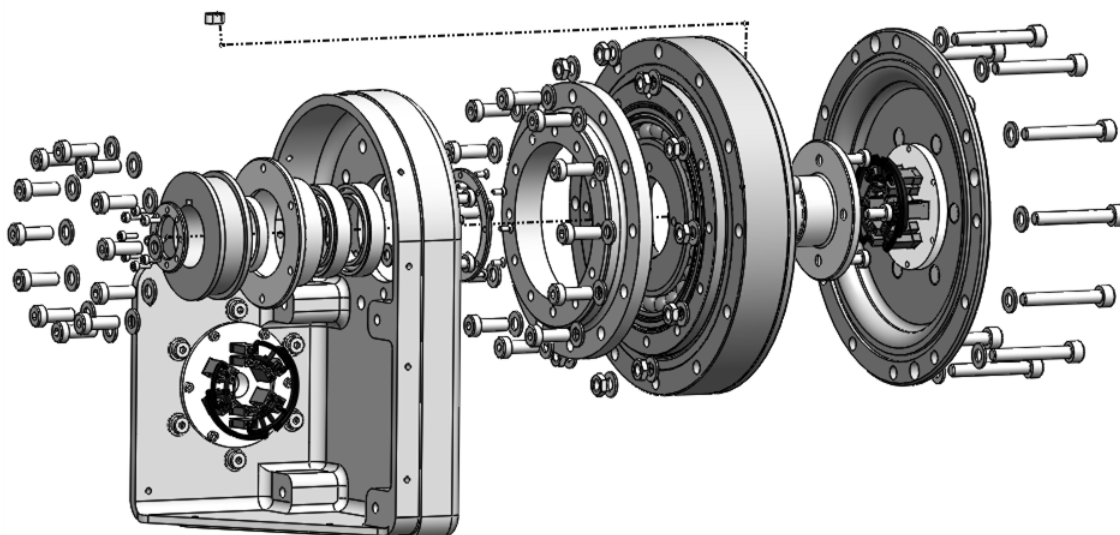
Obr. 6.2 Hlavní nosný rám

Pohonný modul je připojen k předchozímu článku manipulátoru přes přírubu s kolíky, které mají na sobě vybrání pro zamykání. Zamykání je realizováno v propojovacím modulu. Příruba je pevně přimontována k postrannímu výběžku hlavního rámu. Druhá příruba je součástí víka výstupního dílu harmonické převodovky. Tato příruba je pohyblivá a přenáší rotační pohyb na následující modul manipulátoru.

Na hlavní rám je převodovka přimontována přes vymezovací díl, který vytvoří dostatek prostoru pro připojení převodovky, a také umožní zmenšení hlavního rámu v místě montážních otvorů pro napojení statického dílu harmonické převodovky.

Hřídel přenášející krouticí moment z řemenice do převodovky je usazena ve dvojici ložisek v ocelovém ložiskovém domku. Domek je přimontován k hlavnímu rámu. Pro axiální zajištění ložisek je použito víčko.

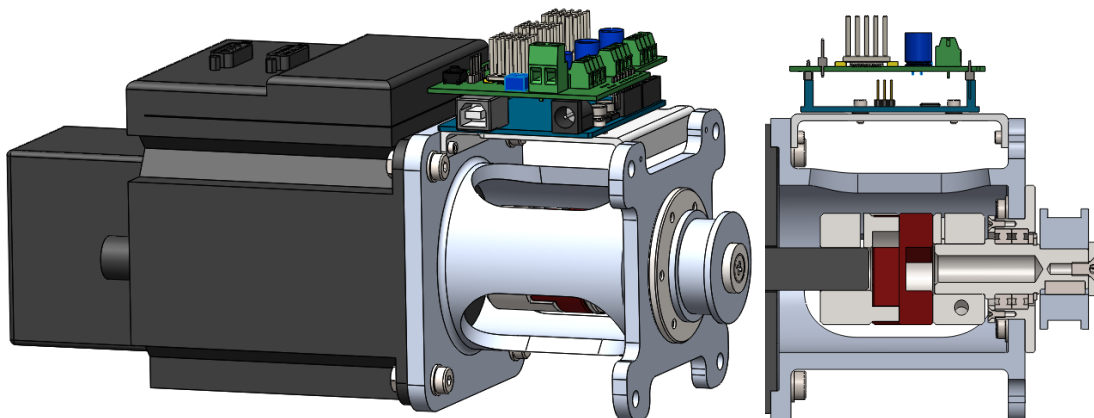
Pohonná jednotka je k rámu přimontována čtyřmi šrouby do vytvořených nálitků. Zde jsou díry se závitem. Jelikož se jedná o hliník, je do závitu vložena vložka HELICOIL [38], aby nedošlo ke stržení závitu v měkčím materiálu.



Obr. 6.3 Montáž hlavního rámu

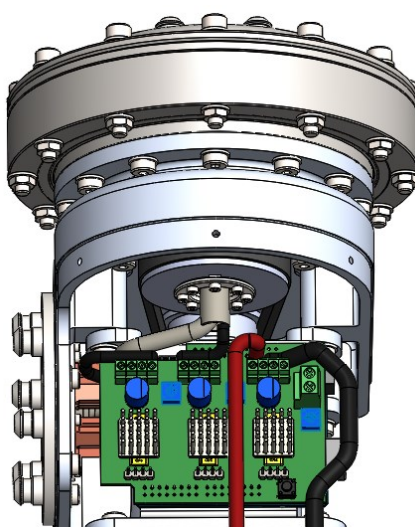
Rám musí být poskládán v následujícím pořadí. Nejprve je do otvoru hliníkového rámu vsazen ložiskový domek a přimontován šesti šrouby M4 x 8 s podložkami. Po vsazení dvojice ložisek jsou axiálně zajištěna víčkem. Druhým krokem je vsazení hřídele do převodovky a přitažení čtyřmi šrouby M4 x 8 ke generátoru vln, tedy vstupnímu dílu převodovky. Následuje přišroubování distančního kroužku dvanácti šrouby M5 x 14 s podložkami ke statickému dílu harmonické převodovky. Z převodovky vystupuje hřídel, který se vsadí do ložisek v hlavním rámu. Po dosednutí distančního kroužku na hlavní rám se obě části smontují dvanácti šrouby M5 x 14 s podložkami. Na hřídel je nasazen distanční kroužek délky 4 mm a do drážky vsazeno těsné pero. Dalším krokem je nasazení řemenice. Do hřídele je vsazeno ložisko proti otěru kabelu a spolu s řemenicí axiálně zajištěno víčkem. Ložisko je vsazeno i na druhé straně hřídele a zajištěno víčkem. Po protažení kabeláže a připojení příruby na výstupním krytu převodovky může být po namazání převodovky tukem nasazen kryt. Ocelový kryt je přimontován k výstupnímu dílu převodovky. Těsnost je zajištěna O kroužkem umístěným do drážky v krytu a převodovce. Díl je po obvodu přimontován dvanácti šrouby M5 x 35 s podložkami a šrouby jsou zajištěny nízkou šestihrannou maticí. Na boční stěnu rámu je přimontována připojovací příruba šesti šrouby M4 x 10 s podložkami, šrouby jsou zkráceny na 9 mm, aby nevyčnívaly. Na závěr je do příruby vsazen konektor, který je pojištěn šesti šrouby M2 x 5.

Pohon, skládající se z motoru, brzdy enkodéru a řídicí jednotky v jedné sestavě, je připojen přes vymezovací díl, který vytváří prostor pro hřídelovou spojku Oldham [39]. Za spojkou navazuje hřídel uložená ve dvojici ložisek v ocelovém ložiskovém domku, který je připojen na tento díl. Díl je vyroben soustružením a frézováním z hliníkové slitiny.



Obr. 6.4 Připojení pohonu

Shora je přimontován držák elektroniky, kde je umístěna deska plošného spoje pro ovládání modulu a komunikaci s ostatními moduly. K elektronice je vedena kabeláž od přírub. To jsou dva napájecí kabely a dva komunikační kabely pro sběrnici CAN. Třetím vstupem je pohonná jednotka modulu. CAN komunikační konektor se nachází na zadní straně motoru. Napájení je řešeno shora, kde je víceúčelový konektor. Kvůli jeho velikosti je počítáno s napojením napájecích kabelů přímo do pohonné jednotky vyvrtaným otvorem v krytu.



Obr. 6.5 Vedení kabeláže

Kabeláž k otáčivé přírubě je vedena dutou hřídelí a otvorem v převodovce. Aby nedošlo k prošoupání kabelu, jsou v hřídeli malá ložiska. Mezi přírubami je navíc průchodka pro protažení vlastního kabelu (například ethernet/optický).

Krouticí moment z pohonné jednotky na vstup harmonické převodovky se přenáší ozubeným řemenem. Převod ozubeným řemenem má řadu výhod. Zajišťuje synchronní chod bez prokluzu, což je u manipulátoru nezbytné. Oproti převodu ozubenými koly je tichý, umožňuje přenos krouticího momentu na větší osové vzdálenosti a při použití hliníkových řemenic je také hmotnostně výhodnější. Řemenový převod není potřeba mazat a oproti klínovým řemenům ozubené nepracují s velkým předpětím.

6.1.1 Volba řemene

Předběžnou analýzou bylo zjištěno, že je třeba k převodovému poměru harmonické převodovky 1:160 předřadit převod 1:1,5. Převodový poměr je dán počtem zubů. Pro největší modul byla zvolena hnací řemenice s 20 zuby a hnaná řemenice má 30 zubů.

Roztečné průměry řemenic:

$$d_{w1} = 31,83 \text{ mm}$$

$$d_{w2} = 47,75 \text{ mm}$$

Osová vzdálenost:

$$A_{MIN} = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot (d_{w1} + d_{w2}) = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot (31,83 + 47,75) = 56,27 \text{ mm}$$

$$A_{MAX} = 2 \cdot (d_{w1} + d_{w2}) = 2 \cdot (31,83 + 47,75) = 159,16 \text{ mm}$$

Volím osovou vzdálenost **70 mm**.

Úhel opásání:

$$\cos \frac{\alpha}{2} = \frac{d_{w2} - d_{w1}}{2 \cdot A} \quad \frac{\alpha}{2} = \cos^{-1} \left(\frac{d_{w2} - d_{w1}}{2 \cdot A} \right) = \cos^{-1} \left(\frac{47,75 - 31,83}{2 \cdot 70} \right) = 83^{\circ}28'$$

Doplňkový úhel:

$$\gamma = 90 - \frac{\alpha}{2} = 90 - 83^{\circ}28' = 6^{\circ}31'$$

Délka řemene:

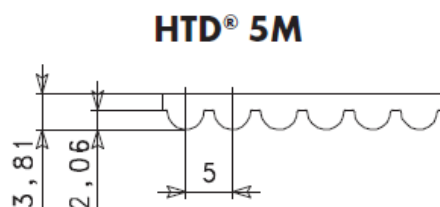
$$\begin{aligned} L' &= 2 \cdot A \cdot \sin \frac{\alpha}{2} + \frac{\pi}{2} \cdot (d_{w1} + d_{w2}) + \frac{\pi \cdot \gamma}{180} \cdot (d_{w2} - d_{w1}) = \\ &= 2 \cdot 70 \cdot \sin 83^{\circ}28' + \frac{\pi}{2} \cdot (31,83 + 47,75) + \frac{\pi \cdot 6^{\circ}31'}{180} \cdot (47,75 - 31,83) = 265,91 \text{ mm} \end{aligned}$$

Volím řemen délky **265 mm**.

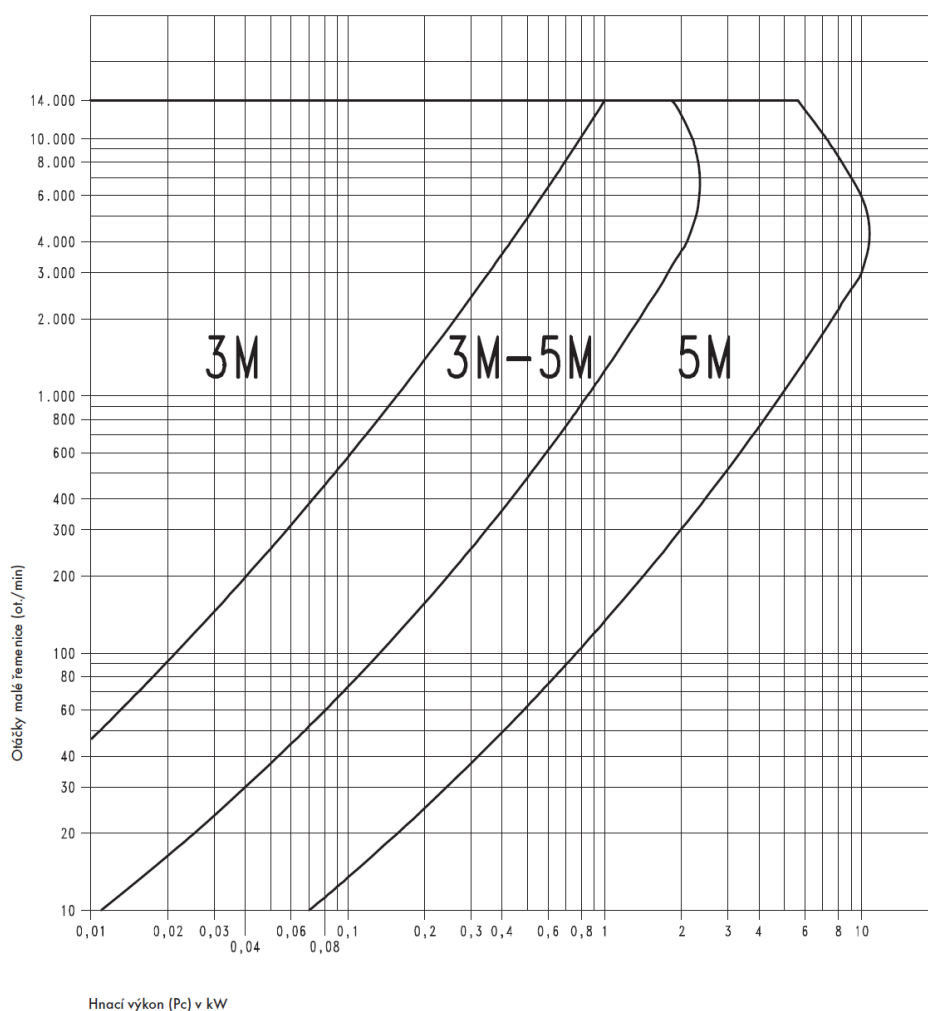
Skutečná osová vzdálenost:

$$A_{SK} = \frac{1,004 \cdot L - \frac{\pi}{2} \cdot (d_{w1} + d_{w2}) - \frac{\pi \cdot \gamma}{180} \cdot (d_{w2} - d_{w1})}{2 \cdot \sin \frac{\alpha}{2}} =$$

$$A_{SK} = \frac{1,004 \cdot 265 - \frac{\pi}{2} \cdot (31,83 + 47,75) - \frac{\pi \cdot 6^\circ 31'}{180} \cdot (47,75 - 31,83)}{2 \cdot \sin 83^\circ 28'} = 70,1 \text{ mm}$$

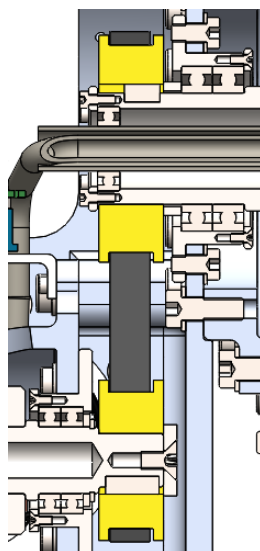


Obr. 6.6 Profil řemene HTD



Obr. 6.7 Nomogram pro volbu řemene

Pro největší pohonný modul byl podle přenášeného momentu a otáček zvolen řemen s profilem HTD roztečí 5M a šířce 9 mm. Osová vzdálenost mezi řemenicemi je 70 mm a z toho byla vypočtena délka řemene 265 mm. Vybraný řemen je tedy HTD-05M-265-09. Řemenice jsou standardních rozměrů z hliníkové slitiny. Zajištění proti prokluzu řemenic na hřídeli je realizováno těsným perem. Axiální posuv zamezují víčka.



Obr. 6.8 Zvýrazněný řemenový převod

Řemen bude nasazen při montáži na zvolenou osovou vzdálenost. Aby šel nasadit, bude hnaná řemenice opatřena sundavací bočnicí. V případě, že by bylo řemen mírně dopnout, docílí se tak posuvem pohonné podstavy směrem dolů.

Řemenový převod má velmi vysokou účinnost 98 – 99%, harmonická převodovka s převodovým poměrem 1:160 má však účinnost mnohem nižší. Z katalogových hodnot lze vyčíst, že při uvažovaných otáčkách a teplotě 20 – 30°C se účinnost pohybuje okolo 60%. Tato účinnost má vliv na přenášený krouticí moment. Výhodou konstrukce je, že převodovka je umístěna vně rámu a teplo vznikající jako ztráty může unikat do prostředí a neakumuluje se v modulu. Výstupní krouticí moment největšího modulu může tedy dosahovat této maximální hodnoty:

$$T = T_{MOT} \cdot i \cdot \eta_{rem} \cdot \eta_{přev} = 1,45 \cdot 240 \cdot 0,98 \cdot 0,6 = \mathbf{204,624 Nm}$$

$$T_{MAX} = T_{MOT(MAX)} \cdot i \cdot \eta_{rem} \cdot \eta_{přev} = 3,39 \cdot 240 \cdot 0,98 \cdot 0,6 = \mathbf{478,4 Nm}$$

Tato hodnota musí být softwarově **omezena!** Převodovka může být chvilkově přetížena momentem 445 Nm.

6.1.2 Parametry nejvýkonnějšího pohonného modulu

V tabulce jsou vypsány základní dosažené parametry u nejvýkonnějšího pohonného modulu, který je poháněn sestavou Animatics SM34165DT. Převodovka Harmonic Drive SHD-2SH je ve velikosti 32.

Tab. 6.1 Parametry pohonného modulu

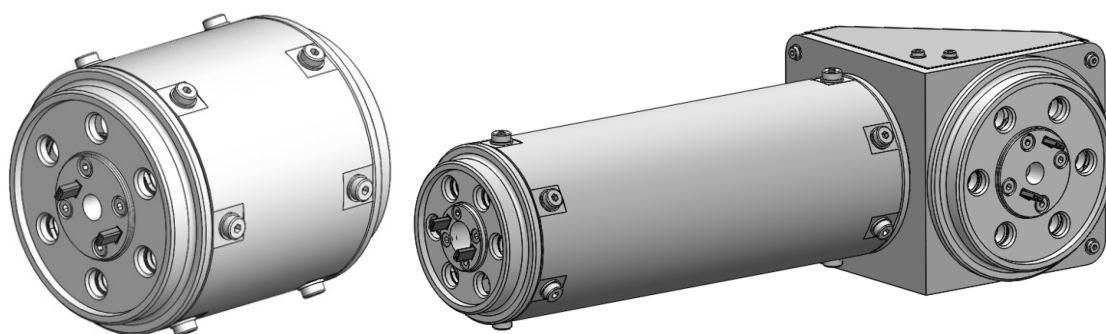
Parametr	Hodnota	Poznámka
Napájecí napětí	42 VDC	Vychází z potřebných otáček pohonu
Maximální odebíraný proud	15,5 A	Při zvoleném režimu by měl být odběr kolem 5 A.
Krouticí moment	204 Nm	
Maximální krouticí moment	445 Nm	Omezeno převodovkou
Rozsah rotace	Teoreticky neomezeno	Omezen kroucením kabeláže
Vnější rozměry (d x š x v)	316 x 142 x 193 mm	
Hmotnost	7,6 kg	
Počet přírub	2	Napojení na další moduly
Průchodnost kabeláže	2x data, 2x napájení	Průchodka pro vlastní kabel

Pro manipulátor jsou uvažovány ještě dva méně výkonné a menší moduly. Pohony Animatics SM23165DT o výkonu 185 W a převodovka velikosti 25 pro prostřední modul a Animatics SM17205D o výkonu 130 W s převodovkou velikosti 17 pro modul nejmenší.

Modul byl provizorně zakrytován víkem vyrobeným z tenkého plechu. Zadní díl je navržen pro výrobu technologií 3D tisku. Tento díl slouží pouze jako kryt a není namáhán, je tedy navržen, aby měl co nejnížší hmotnost a byl samonosný. Spoje jsou nýtovány a tmeleny pro zajištění požadovaného krytí.

6.2 Propojovací modul

Pohonné moduly manipulátoru jsou spojovány pomocí pasivních propojovacích modulů, které zajistí vytvoření požadované kinematické struktury. Propojovací modul může propojovat dva moduly pohonné nebo může sloužit ke kotvení k základně, kde bude umístěna příruba s kolíky podobně jako na pohonném modulu. Třetí možností je připojení koncového efektoru na zápěstí manipulátoru. Základní propojovací modul tvoří dvě zamykatelné příruby a rám. Ten může být rovný ve formě trubky sloužící jako distanční prvek, nebo může umožňovat změnu směru. Navržen byl pasivní modul ve tvaru L a distanční modul různých délek.



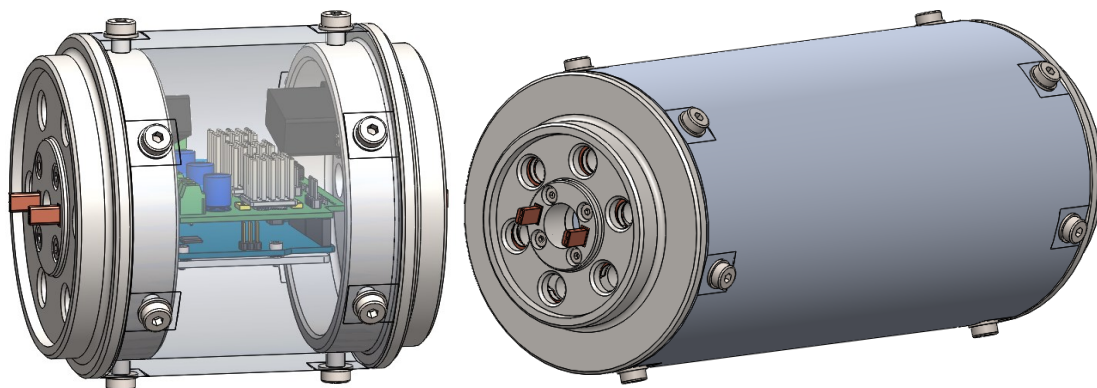
Obr. 6.9 Pasivní propojovací modul

Příruby mají automatický zamykací mechanismus, který umožní pevné spojení modulů. Propojovací moduly mají příruby s otvory a pohonné moduly jsou opatřeny přírubami s kolíky, které do otvorů zapadnou. Přenos sil je zajištěn šesti kolíky a osazením přírub.

Příruby jsou navrženy z oceli, protože budou silně namáhány na otlacení v kolíkových spojích. L profil je navržen z hliníkové slitiny a trubky jsou navrženy z hliníkové slitiny také. Hliníková slitina může být nahrazena i kompozitním materiálem, aby bylo dosaženo co nejnižší hmotnosti.

Modul kromě silového působení musí přenést napájecí napětí k dalšímu pohonnému kloubu a také řídicí signály. Konektory v přírubách je signál veden na řídicí desku, odkud jsou ovládány servomotory pro zamykání, modul se dále identifikuje pro softwarové zjištění kinematické struktury.

Rovný distanční modul slouží k vytvoření vazby mezi moduly, kdy jsou moduly posunuty v jedné ose. Příruby mohou být spojeny v šesti polohách, může tedy dojít ještě k rotaci kolem této osy. Rovný modul je nejjednodušší a může mít různou délku. Ta je dána délkou trubky. Nejmenší délka je omezena deskou plošného spoje, který se musí v trubce umístit. Největší délka není omezena, ale je třeba počítat s výkonem pohonného modulu.

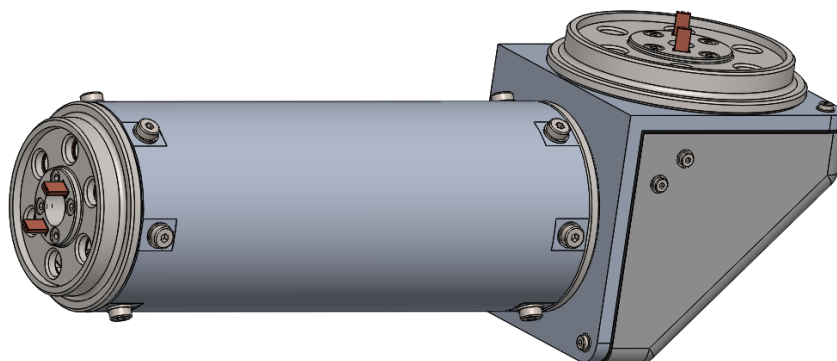


Obr. 6.10 Rovný propojovací modul

Propojovací moduly jsou také modulární konstrukce, kdy rám určující tvar zařízení je opatřen víky s propojovacími přírubami. Víka jsou přimontována k rámu (trubce) po obvodu a mohou být různě kombinovaná. Pro krátké délky modulů mohou být použita víka se stejnou velikostí propojovacích přírub. Pro moduly větších délek je uvažováno použití vík s různou velikostí těchto přírub. Změnou velikosti dojde k omezení připojení následujících modulů. Při použití delšího modulu bude muset být na konci pohonný modul nižší hmotnosti a výkonu. Zamezí se tak skládání manipulátorů, kde by docházelo k velkému přetížení pohonných modulů.

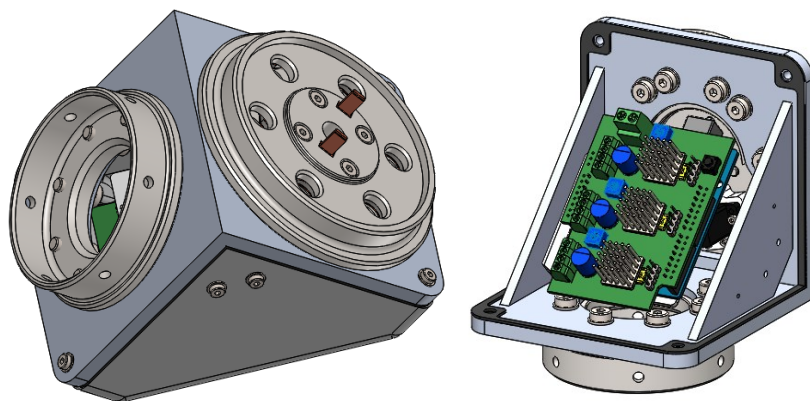
Navržené moduly mají robustní konstrukci, jelikož přenášejí velká zatížení. Jak bylo zmíněno výše, samotné moduly jsou modulární. Podle potřeby a aplikace se mohou skládat z různých rámců a vík. Tyto součásti mohou být optimalizovány a upraveny podle požadavků dané aplikace. Pro díly tedy mohou být použity různé materiály a navrženo odlehčení v méně namáhaných místech.

Modul tvaru L je tvořen dvěma základními prvky – standardním hliníkovým L profilem, který má již z výroby zaručenou kolmost a trubkou. Tyto dva prvky jsou spojeny ocelovou přírubou, která má osazení na straně profilu a lem na straně trubky. Spojení je montované. Při optimalizaci by pro snížení hmotnosti bylo vhodné ověřit použití svarového spoje.



Obr. 6.11 Propojovací modul tvaru L

Délka a rozměry jsou proměnné podle propojovaných pohonných modulů. Elektronika je ukryta v L profilu, délka trubky tedy může být velmi malá. Při použití delší trubky je opět nutné uvažovat s výkonem pohonných modulů a víko by tedy mělo mít připojovací přírubu menší velikosti pro připojení pohonného modulu nižší řady.

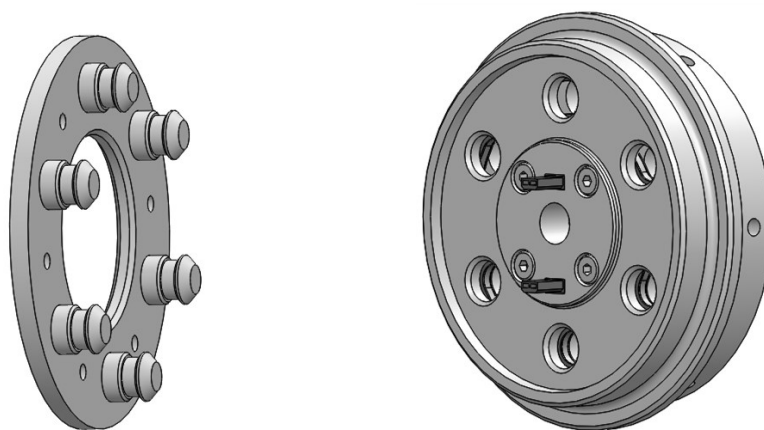


Obr. 6.12 Hlava modulu

Hliníkový L profil je vyztužen žebry, které jsou k profilu přivařeny. Na jednom z žebër je přimontována elektronika. Řídicí deska se opět stará o uzamykání přírub a identifikaci modulu. Vstupní příruba se nachází na víku podobném, jako u rovných dílů. Víko je upraveno pro montáž na plochu.

Kryt modulu není namáhán a může být proto vyroben z tenkého plechu nebo technologií 3D tisku. Kryt je přichycen k profilu šrouby. Mezi profil a kryt je vloženo gumové těsnění.

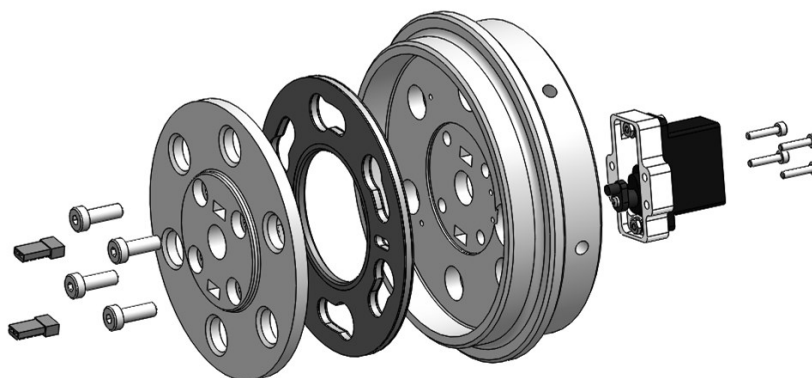
V každém víku s připojovací přírubou je zamykací mechanismus, který umožňuje pevné spojení dvou modulů. Ke spojení může dojít mezi pasivní přírubou s kolíky, která je použita u pohonných modulů a aktivní přírubou se zámkem použitou u propojovacích modulů. Zamykání modulu zajišťuje tvarová kulisa, která při pootočení zmenší otvor v přírubě a uzamkne kolíky pohonného modulu, které jsou v místě zamykání zúženy.



Obr. 6.13 Pasivní a aktivní příruba

Pasivní příruba je ocelový disk, ve kterém jsou nalisovány kolíky speciálního tvaru. Do otvoru přesně zapadá osazení aktivní přírub, které odlehčí kolíkům od namáhání kolmo na osu spoje. Příruba je pomocí šroubů přimontována k modulu.

Aktivní příruba je komplikovanější. Je umístěna na víku propojovacích modulů. Víko se skládá z rámu víka, kterým je přichyceno k rámu propojovacího modulu, zamykací kulisou a jejím pohonným mechanismem a přírubou vytvářející kontakt mezi moduly.



Obr. 6.14 Aktivní (zamykací) příruba

Příruba vymezuje prostor, ve kterém se kulisový kotouč otáčí. Ve směru osy rotace je prostor vymezen délkou osazení, po kterém kotouč klouže. Pro snížení tření mezi plochami kulisového kotouče, víka a příruby je kotouč polepen tenkou vrstvou vysoce kluzného materiálu, do otvoru je navíc vložen kluzný kroužek. Celou sestavu drží pohromadě 4 šrouby, které mají hlavy zapuštěné do příruby a prostupují do závitových děr vytvořených ve víku.

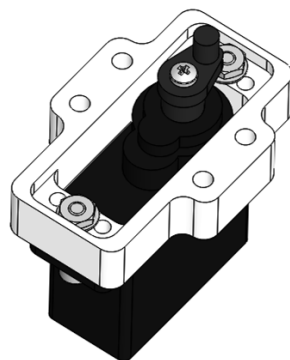
Principem zamykání je změna průměru otvoru pro kolík. V první poloze je průměr otvoru kulisového kotouče mírně větší než průměr díry v přírubě. Pootočením kotouče o zhruba 20° se průměr otvoru zmenší. Pootočení zajišťuje modelářský servomotor opatřený hliníkovým nástavcem, na kterém se nachází čep. V kulisovém disku je potom drážka, ve které čep jezdí. Na obrázku Obr. 6.15 jsou zobrazeny krajní polohy, kdy se modelářský servomotor otočí o 180°. Při vhodném nastavení natočení, jako je vyobrazeno v poloze zamknuto, je čep zablokován a znemožňuje otočení kulisového disku bez použití brzdy nebo jiného způsobu aretace.



Obr. 6.15 Princip zamykání

Pro přírubu největšího a středního průměru, tedy 80 a 60 mm je použit servomotor Hitec HS-65MG [40] s kovovými převody pro vyvození vyššího točivého momentu. Hliníkový nástavec je standardní díl zkrácený na požadovanou délku. Pro nejmenší přírubu o průměru 40 mm je využito modelářské nano servo Hitec HS-35HD.

Servomotor je k víku připevněn dílem vytvořeným technologií 3D tisku. Spojovací materiál je velikosti M2 a vačka vytvořená z nástavce a čepu je k servomotoru připevněna šroubem dodávaným k nástavcům pro modelářské servomotory [41].



Obr. 6.16 Připojení servomotoru

Zamykací příruba může být optimalizována, aby plnila svou funkci při co nejmenší hmotnosti a rozměrech. V tabulce Tab. 6.2 byly vypsány další možnosti pro zlepšení mechanismu.

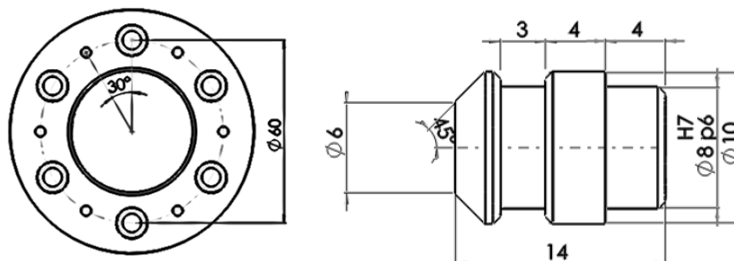
Tab. 6.2 Morfologická matice možností

Univerzálnost	Pasivní/aktivní	Univerzální	
Zamykací mechanismus	Kulisové západky	Kuličky	Vnější závit
Pohon zamykání	Modelářské servo	Prstencový motor	
Poloha zamykání	Jedna poloha	Omezený počet poloh	Libovolná poloha
Zamezení spojení nevhodných modulů	Rozdíl průměrů přírub	Tvarová rozdílnost	
Otáčení kulisy	Vačka	Ozubení	

7 Kontrola vybraných komponent

7.1 Kontrola kolíků na přírubách

Kolíky mají uložení s přesahem H7/p6. U příruby s vnějším průměrem 80 mm je na poloměru 30 mm nalisováno 6 kolíků. Lisovaný průměr je 8 mm.



Obr. 7.1 Lisovaný spoj

Kolíky přenáší krouticí moment jedné příruby na druhou, jsou tedy namáhány na stříh, protože příruby nejsou tlačeny proti sobě, aby byl zaručen třecí spoj. Ostatní síly, které by mohly způsobit střižný účinek na kolíky, zachycuje osazení na přírubách.

$$T_{max} = 445 \text{ Nm}$$

Maximální krouticí moment

$$r = 30 \text{ mm}$$

Roztečná kružnice kolíků

$$n = 6$$

Počet kolíků

$$F = \frac{T_{max}}{r \cdot n} = \frac{445}{0,03 \cdot 6} = 2472,22 \text{ N}$$

Střižná síla na jeden kolík

$$d = 8 \text{ mm} \quad b = 4 \text{ mm}$$

Průměr kolíku, délka konce

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 8^2}{4} = 50,27 \text{ mm}^2$$

Průřez nalisované části kolíku

Kontrola na stříh

$$\tau_{DOV} = 80 - 100 \text{ MPa}$$

Dovolené napětí ve stříhu

$$\tau = \frac{F}{S} = \frac{2472,22}{50,27} = 49,18 \text{ MPa}$$

Napětí vyhovuje

Kontrola na otláčení

$$p_{DOV} = 100 - 150 \text{ MPa}$$

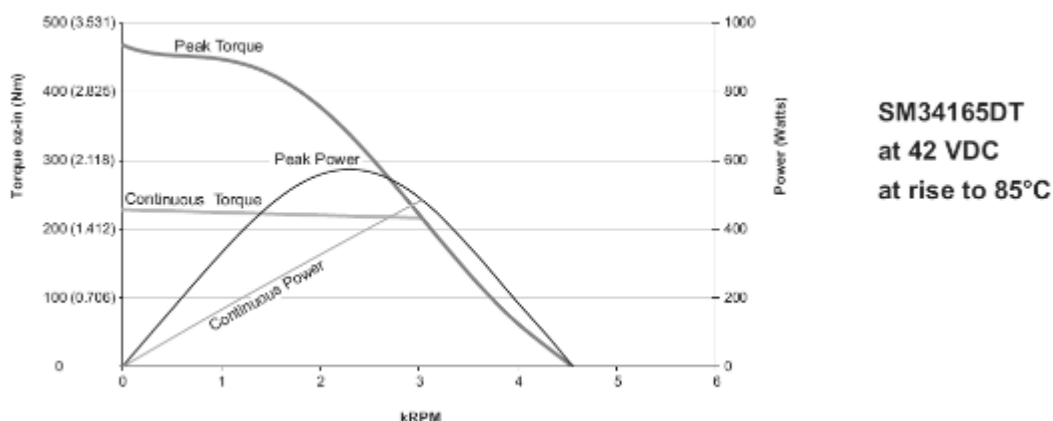
Dovolený tlak na otláčení

$$p = \frac{F}{d \cdot b} = \frac{2472,22}{8 \cdot 4} = 77,26 \text{ MPa}$$

Tlak vyhovuje

7.2 Návrh a kontrola těsných per pro řemenice

Hnací řemenice je na hřídeli, která je připojena přes spojku k hřídeli motoru. Hodnota krouticího momentu je zde tedy výstupní moment pohonu.



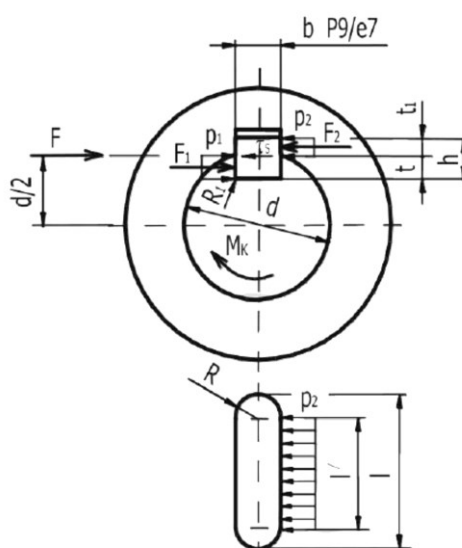
Obr. 7.2 Charakteristika pohonu

Pohon je navržen tak, aby při požadovaných otáčkách jel na maximálním výkonu, čehož je docíleno napájecím napětím 42V. Při otáčkách 2300 za minutu je maximální špičkový moment 2,3 Nm.

$$M_K = 2,3 \text{ Nm}$$

Maximální krouticí moment pohonu

Předběžně byl navržen konec hřídele o průměru 12 mm. Pro tento průměr hřídele je doporučeno těsné pero o šířce i výšce 4 mm. V hřídeli je závit M4.



Obr. 7.3 Těsné pero

$$b = 4 \text{ mm}$$

$$t = 2,4 \text{ mm}$$

Rozměry těsného pera

$$h = 4 \text{ mm}$$

$$t_1 = 1,6 \text{ mm}$$

Kontrola hřídele z podmínky krutu

$$\tau_{DK} = 20 \text{ MPa}$$

Dovolené napětí pro krut ocelových hřídelů

$$\tau_K = \frac{M_K}{W_K} = \frac{M_K}{\frac{\pi \cdot (d^3 - d_{M4}^3)}{16}} \leq \tau_{DK}$$

$$\tau_K = \frac{2300}{\frac{\pi \cdot (12^3 - 4^3)}{16}} = 7 \text{ MPa}$$

Navržený průměr 12 mm **vyhovuje**.

$$F_2 = \frac{M_K}{\frac{d}{2} + \frac{t_1}{2}} = \frac{2300}{\frac{12}{2} + \frac{1,6}{2}} = 338,24 \text{ N}$$

Síla působící na bok těsného pera

Kontrola na otlačení

$$p_D = 40 \text{ MPa}$$

Dovolený tlak na otlačení hliníkové slitiny

$$p_2 = \frac{F_2}{t_1 \cdot l_2} \leq p_D \quad l_2 \geq \frac{F}{t_1 \cdot p_D} + b = \frac{339}{2,4 \cdot 40} + 4 = 9,3 \text{ mm}$$

Délka pera je navržena na **12 mm**.

Dodatečná kontrola na stříh

$$\tau_{DS} = 30 \text{ MPa}$$

Dovolené napětí ve stříhu pro těsné pero

$$\tau_S = \frac{F_2}{b \cdot l_1} \leq \tau_{DS} \quad l_1 \geq \frac{F_2}{b \cdot \tau_{DS}} = \frac{339}{4 \cdot 30} = 2,85 \text{ mm}$$

Střížná podmínka **vyhověla**.

Bylo navrženo **PERO 4e7x4x12 ČSN 02 2562**

Hnaná řemenice přenáší na hřídel vyšší krouticí moment daný zvoleným převodovým poměrem 1:1,5.

$$i = 1,5$$

$$\eta = 0,98$$

Parametry převodu

$$M_{K2} = M_K \cdot i \cdot \eta = 2,3 \cdot 1,5 \cdot 0,98 = 3,38 \text{ Nm}$$

Krouticí moment hnaného hřídele

Předběžně byl navržen dutý hřídel o vnějším průměru 25 mm a vnitřním průměru 18 mm. Pro tento rozměr hřídele je doporučená velikost těsného pera s šířkou 10 mm a výškou 8 mm, jelikož je přenášený krouticí moment malý, bylo zvoleno pero menší, stejného rozměru, jako na hnacím hřídeli.

$$\tau_K = \frac{M_K}{W_K} = \frac{M_{K2}}{\frac{\pi \cdot (D^3 - d^3)}{16}} \leq \tau_{DK}$$

$$\tau_K = \frac{3380}{\frac{\pi \cdot (25^3 - 18^3)}{16}} = 1,8 \text{ MPa}$$

Navržený dutý hřídel **vyhovuje**.

$$F_2 = \frac{M_K}{\frac{d}{2} + \frac{t_1}{2}} = \frac{3380}{\frac{25}{2} + \frac{1,6}{2}} = 254,14 \text{ N}$$

Síla působící na bok těsného pera

Kontrola na otlačení

$$p_D = 40 \text{ MPa}$$

Dovolený tlak na otlačení hliníkové slitiny

$$p_2 = \frac{F_2}{t_1 \cdot l_2} \leq p_D \quad l_2 \geq \frac{F}{t_1 \cdot p_D} + b = \frac{255}{2,4 \cdot 40} + 4 = 6,66 \text{ mm}$$

Délka pera je navržena na **8 mm**.

Dodatečná kontrola na stříh

$$\tau_{DS} = 30 \text{ MPa}$$

Dovolené napětí ve stříhu pro těsné pero

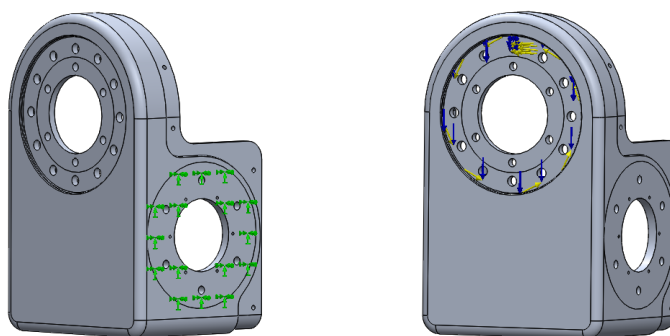
$$\tau_2 = \frac{F_2}{b \cdot l_1} \leq \tau_{DS} \quad l_1 \geq \frac{F_2}{b \cdot \tau_{DS}} = \frac{255}{4 \cdot 30} = 2,13 \text{ mm}$$

Střížná podmínka **vyhověla**.

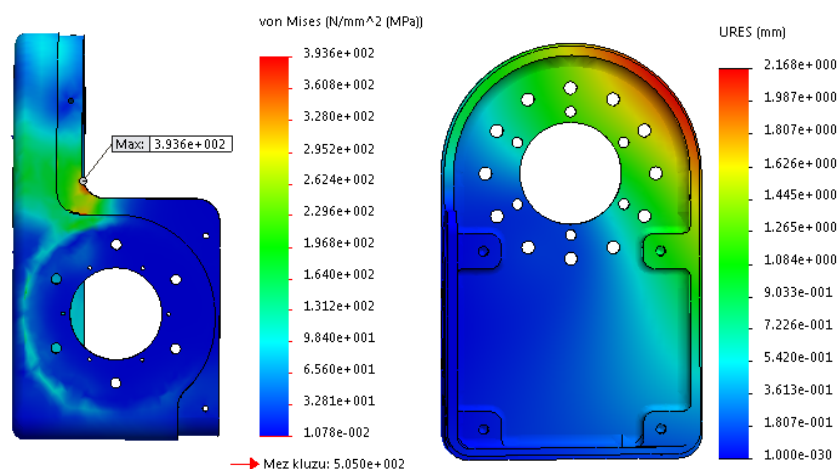
Bylo navrženo **PERO 4e7x4x8 ČSN 02 2562**

7.3 Pevnostní kontrola hlavního rámu

Pevnostní kontrola byla provedena v softwaru SolidWorks Simulation. Kontrola má stanovené okrajové podmínky podle maximálního možného namáhání převodovky modulu, jde tedy o jeho extrémní přetížení. Rám je navržen z odolné slitiny hliníku 7075-T6 s mezí pevnosti 570 MPa a mezí kluzu 505 MPa. Pro analýzu je díl ukotven v místě přípojovací příruby – zelené šipky. Zatížení je potom umístěno na ploše, kde je přes kroužek připojena převodovka. Žluté šipky značí krouticí moment 445 Nm, modré šipky jsou síla od hmotnosti ramene 500 N. Na obrázku není vidět klopný moment 290 Nm.



Obr. 7.4 Okrajové podmínky

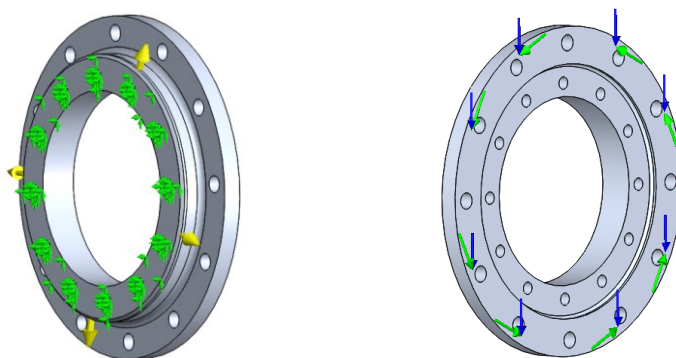


Obr. 7.5 Napětí a deformace

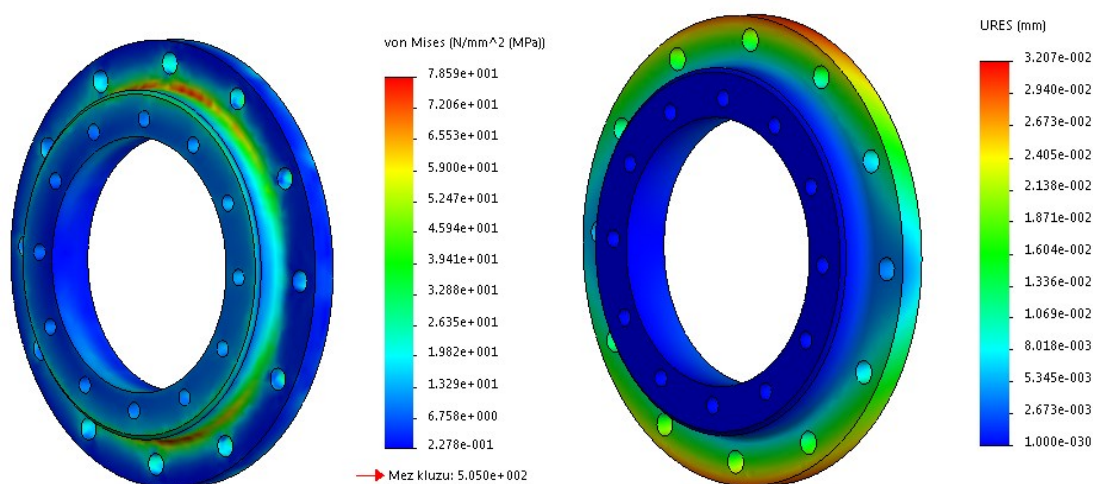
Výsledné napětí má špičku 393 MPa v kritickém zaoblení výběžku pro přírubu. Maximální deformace je 2,2 mm. Při častém zatěžování na mezi únosnosti převodovky po delší dobu by došlo k poškození modulu, toto zatěžování není běžným provozním stavem. Při běžném provozu, tedy zatížení krutem maximálně 200 Nm a klopným momentem 30 Nm dosahuje špičková hodnota napětí 102 MPa v zaoblení nálitku pro šrouby připojující pohonnou jednotku modulu, což je vyhovující vzhledem k mezi kluzu 505 MPa. Maximální deformace je 0,2 mm, tedy desetkrát menší než v kritické situaci.

7.4 Pevnostní kontrola připojovacího kroužku převodovky

Kroužek propojuje hlavní rám a harmonickou převodovku. Je navržen opět z hliníkové slitiny 7075-T6. Na obrázku (Obr. 7.6) jsou použité okrajové podmínky. Na zadní straně (vlevo) je zelenými šipkami zobrazeno třecí spojení s rámem. Žluté šipky naznačují zachycení radiálních sil osazením. Na obrázku vpravo jsou zatěžující síly. Modré šipky označují radiální zatížení od hmotnosti ramene (500 N). Zelené šipky naznačují zatížení krutem, zde je nastavena hodnota 445 Nm, což je maximální špičkový moment pro převodovku. Navíc je nastaven klopný moment 290 Nm, což je také maximální hodnota udávaná výrobcem převodovky.



Obr. 7.6 Okrajové podmínky

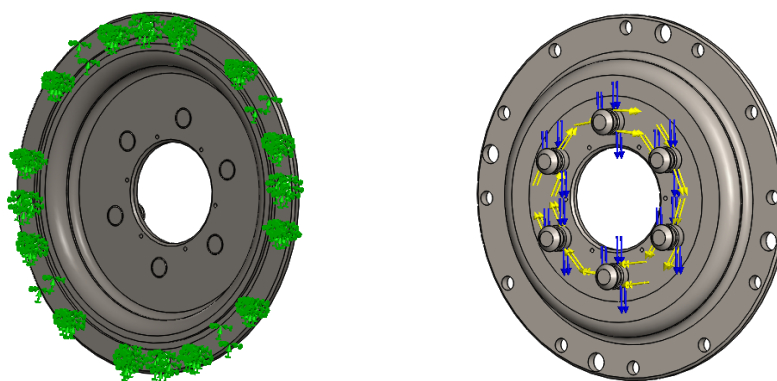


Obr. 7.7 Napětí a deformace v kroužku

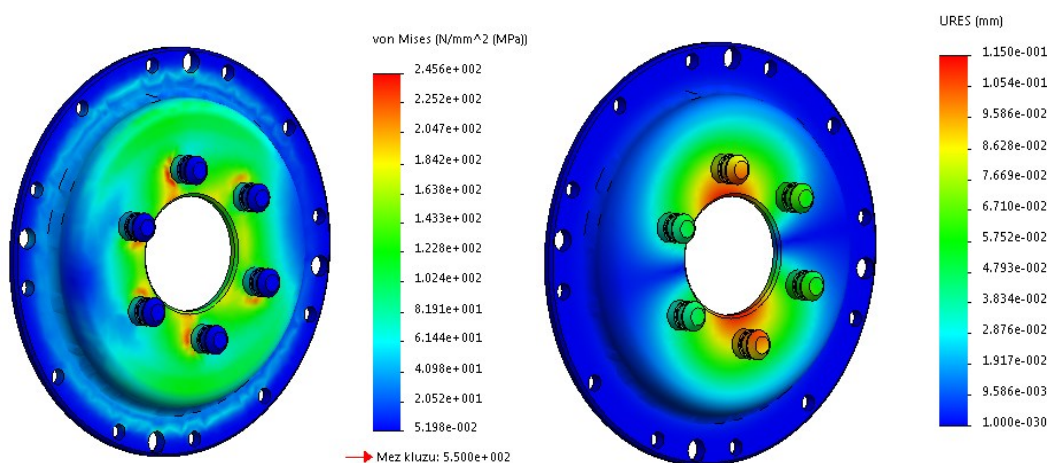
Výsledek pevnostní analýzy je vyhovující. I v extrémním případě přetížení je špička napětí 78,5 MPa a maximální deformace 0,03 mm, při běžném zatížení je napětí 13 MPa. Ve srovnání s mezí kluzu zvoleného materiálu 505 MPa je prvek předimenzován. Rozměry jsou však voleny, aby byl vymezen dostatečný prostor a zajištěna tuhost.

7.5 Pevnostní kontrola výstupního dílu převodovky

Výstupní kryt převodovky přenáší krouticí moment z pohonného modulu na propojovací modul. V krytu jsou nalisovány kolíky. Pevnostní kontrola byla provedena na součásti, kde byly umístěny kolíky a vytvořeny kontakty. Nejde tedy o sestavu. Díl je vyroben z ocelového plechu tloušťky 4 mm metodou lisování. Použitá ocel je nerezová ocel DIN 1.4006 (X10Cr13) s mezí pevnosti 700 MPa a mezí kluzu 550 MPa. Kryt je přimontován k převodovce, uchycení tedy vychází z třecího kontaktu (zelené šipky). Zatížení je opět maximální přípustné v krutu 445 Nm (žluté šipky) a síla od hmotnosti ramene 500 N (modré šipky), klopný moment 290 Nm není na obrázku.



Obr. 7.8 Okrajové podmínky

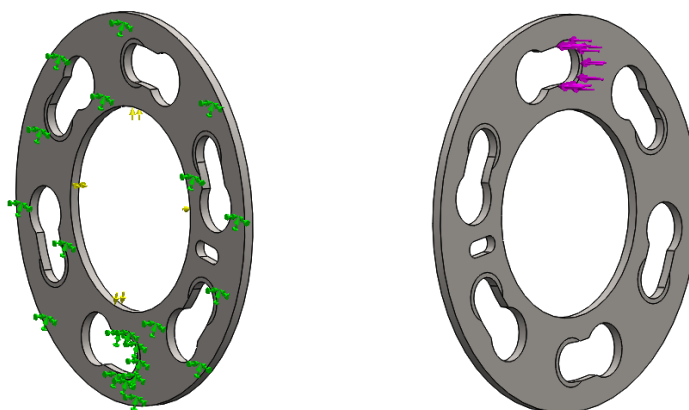


Obr. 7.9 napětí a deformace

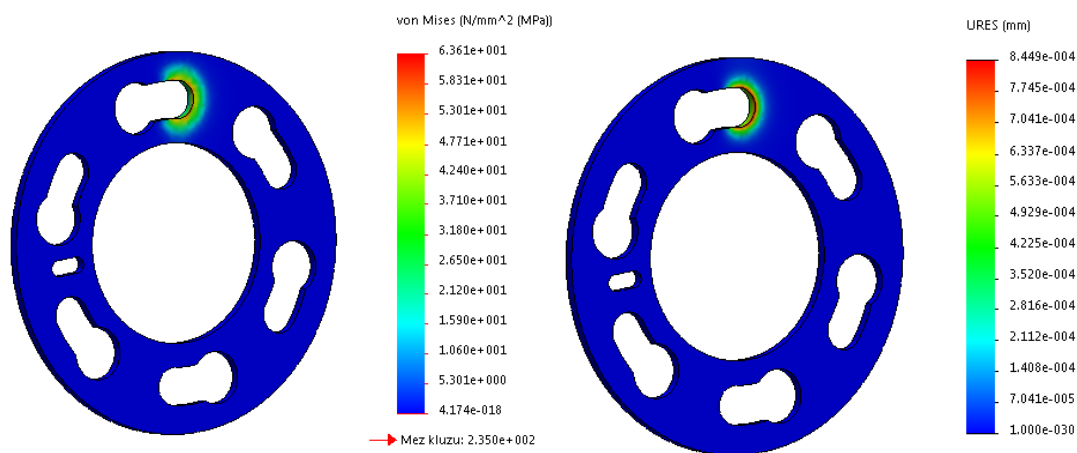
Výsledkem analýzy bylo zjištěno, že špičkové napětí dosahuje 246 MPa, což je ve srovnání s mezí kluzu 550 MPa přijatelné. V důsledku vysokého klopného momentu je maximální posunutí 0,1 mm. Při běžném provozním zatížení je maximální hodnota napětí 55 MPa.

7.6 Pevnostní kontrola kulisového kotouče

Kulisový kotouč slouží k zamykání rychlospojovacího mechanismu. Kotouč je umístěn ve víku propojovacích modulů. Kotouč má vymezený prostor pohybu přírubou, na kterou je nasazen. Příruba zachycuje téměř veškeré zatížení, kotouč je však specificky namáhán. Drží kolíky v axiálním směru. Kontakt mezi kolíkem a kotoučem je velmi malá plocha. V analýze je navržena extrémní situace, kdy vlivem silného klopného momentu veškeré zatížení přenáší pouze jeden kolík. Působící síla je 1000 N. Kotouč je opřen o přírubu, zelené šipky naznačují opření o celou plochu kromě děr pro kolíky. Žluté šipky určují radiální vymezení. Kotouč je zatížen silou na ploše, kde je kolík o něj opřen.



Obr. 7.10 Okrajové podmínky



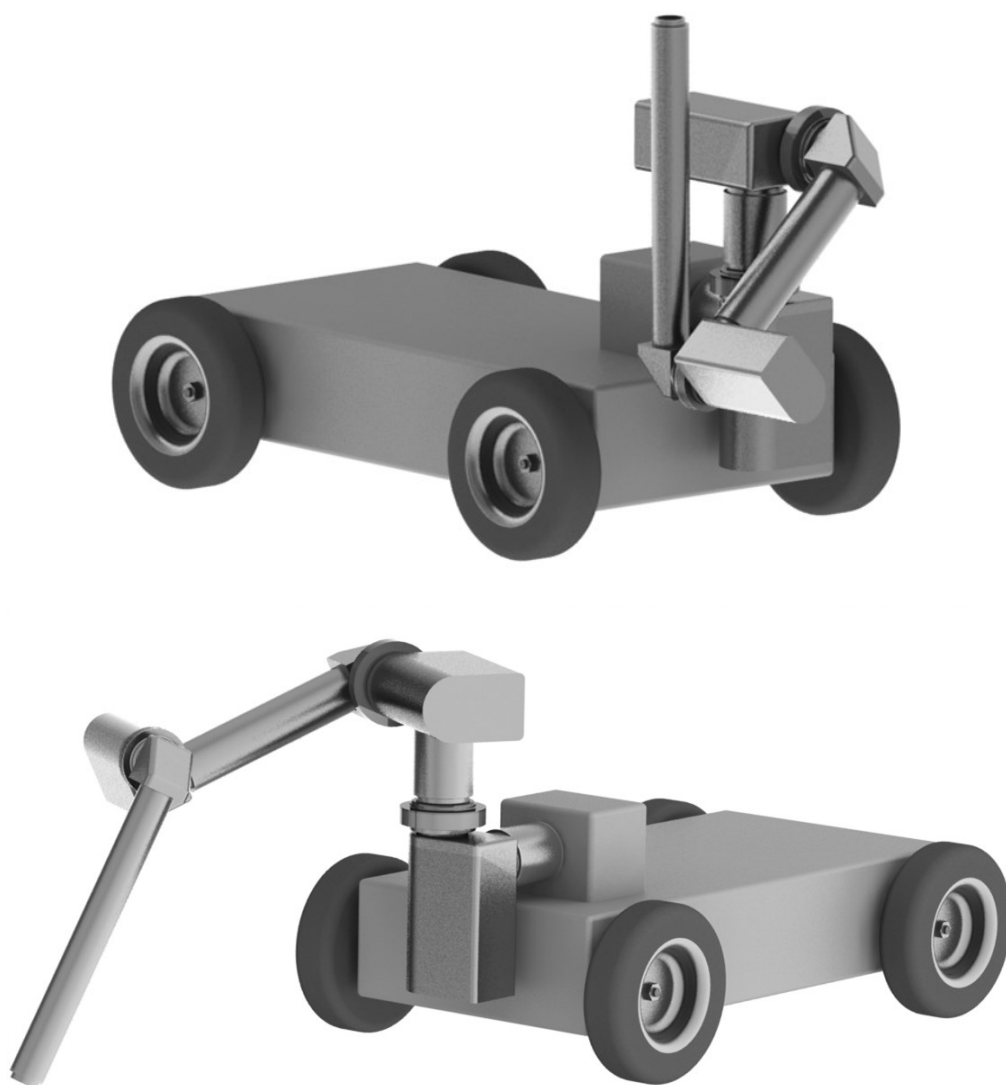
Obr. 7.11 Napětí a deformace

I v extrémním případě a s použitím oceli nízké jakosti s mezí kluzu 235 MPa je napětí 63 MPa vyhovující. Pozornost bude muset být kladena na použitý kluzný povlak kulisy, zda bude vhodné jej použít i v místě tlaku kolíku na kulisu. Běžným rozložením tlaku na všechny kolíky je maximální hodnota 3 MPa.

8 Vizualizace modulárního manipulátoru na mobilním podvozku

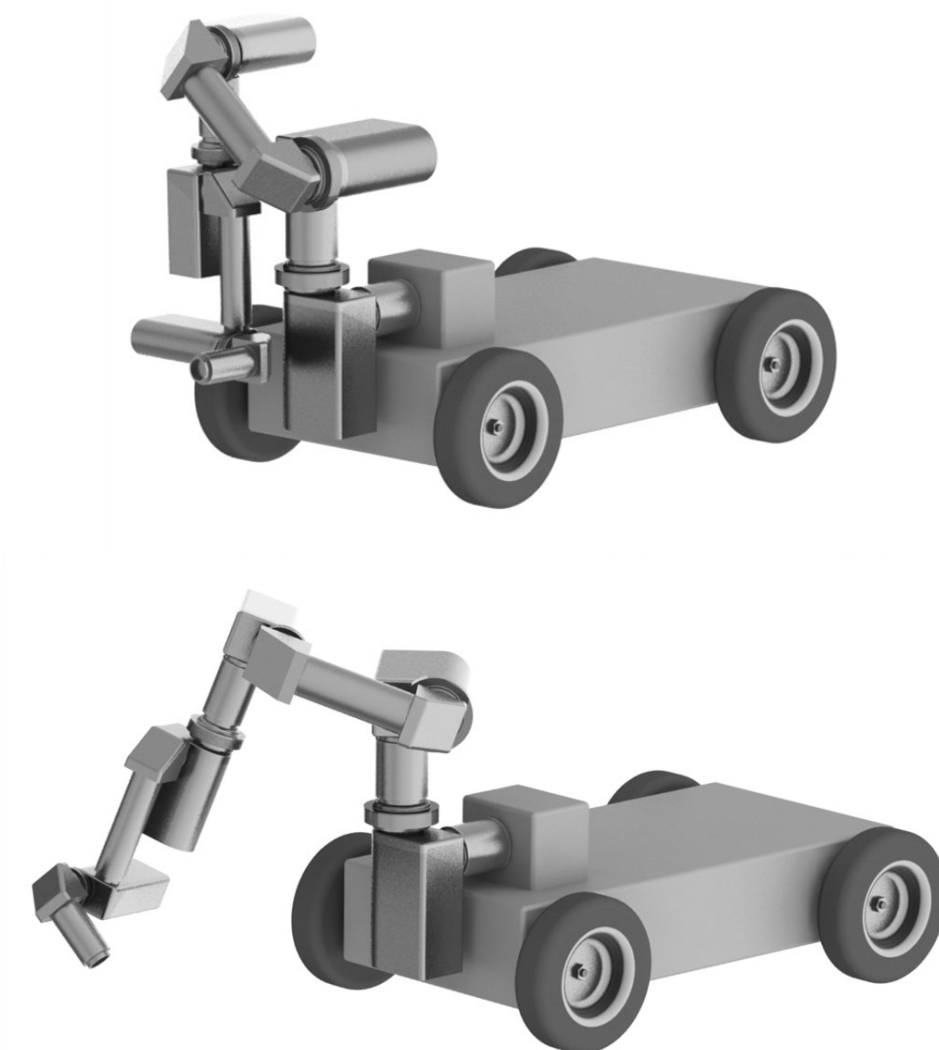
Z navržených modulů byly vytvořeny návrhy vyskládaných manipulátorů se třemi a pěti stupni volnosti. Manipulátor je upevněn na mobilní platformě o rozměrech 500 mm šířka a 1000 mm délka.

Manipulátor se třemi stupni volnosti je k podvozku připojen přes rovný propojovací díl délky 80 mm. O první a druhou rotaci se starají největší navržené pohonné moduly. Moduly jsou propojeny rovným propojovacím modulem délky 80 mm. Třetí stupeň volnosti je realizován pohonným modulem středního výkonu. Mezi moduly je propojovací modul tvaru L a délky 300 mm. Posledním článkem manipulátoru je propojovací díl tvaru L, délky 500 mm.



Obr. 8.1 Manipulátor se třemi stupni volnosti

Manipulátor s pěti stupni volnosti má první dva pohonné moduly stejné. Třetí stupeň volnosti realizovaný pohonným modulem se středním výkonem je připojen propojovacím modulem tvaru U a délky 200 mm. Přes rovný propojovací modul délky 80 mm je připojen druhý pohonný modul středního výkonu. Propojovacím modulem tvaru L a délky 200 mm je připojen pátý pohonný modul. Jedná se o modul s nejnižším výkonem. Výstup manipulátoru je propojovací modul tvaru L, délky 100 mm. Na konci manipulátoru je rychlospojovací příruba, na kterou se připojí koncový efektor.



Obr. 8.2 Manipulátor s pěti stupni volnosti

Z navržených modulů mohou být vyskládány různé manipulátory s odlišnými kinematickými strukturami.

9 Závěr

V diplomové práci byla nejprve provedena rozsáhlá rešerše mobilních robotů s manipulátory, stávajících modulárních manipulátorů a komponent potřebných pro realizaci modulárního manipulátoru. Ze zadání a poznatků průzkumu byl sestaven podrobný požadavkový list obecně pro celý manipulátor, a také pro jednotlivé části modulárního manipulátoru. Pro naplnění stanovených požadavků na výkon a manipulační schopnosti manipulátoru byl proveden návrhový výpočet pro zjednodušenou modelovou situaci manipulátoru s pěti stupni volnosti. Výpočet byl ověřen simulací v 3D CAD systémech SolidWorks a PTC Creo.

Na základě stanovených požadavků a výkonnostních parametrů byly navrženy tři varianty řešení pohonných modulů manipulátoru. U modulů bylo dbáno na vysoký měrný výkon, tedy vysoký výkon při minimálních rozměrech a hmotnosti. Zároveň musely návrhy splnit všechny požadované funkce, jako je průchodnost kabeláže, dostatečná tuhost a přítomnost ploch určených k připojení dalších modulů. Varianty byly posouzeny kritériální analýzou třemi hodnotiteli. Jako optimální varianta byl vybrán návrh s řemenovým převodem mezi motorem a převodovkou. Tato varianta byla podrobně rozpracována a popsána.

Vybraná varianta pohonného modulu byla vypracována do úrovně podrobného 3D modelu. Z důvodu použití pouze na trhu běžně dostupných komponent a technologií, nebylo dosaženo takových výsledků, jako u modulárních systémů vyvíjených ze speciálních komponent vyráběných na míru.

Kromě pohonných modulů bylo navrženo také několik propojovacích modulů pro vytvoření kinematické struktury. Pohonné a propojovací moduly jsou spojovány systémem pro rychlou výměnu, tím je zajištěna možnost operativního přeskládání manipulátoru pro různá použití v krátkém čase. Systém spojování a zamykání je také součástí práce.

Z vytvořených modulů byl vyskládán 3D model ukázkové sestavy manipulátoru pro lepší představu výsledných rozměrů a tvarů modulárního systému.

Největším problémem při návrhu bylo zajištění prostupnosti kabeláže vnitřním prostorem modulů. Jedná se hlavně o vedení skrz pohonnou jednotku. Existující systémy mají speciální motory s dutými rotory o dostatečném výkonu. Zkombinovat motor, brzdu a enkodér z dostupných komponent s průchozím středem je velice obtížné, muselo být proto navrženo alternativní řešení. To oproti speciálním komponentům má výrazně vyšší zástavbové rozměry a hmotnost.

Neméně obtížným problémem bylo vytvoření kompaktního rámu modulu, který vydrží veškeré namáhání při použití lehkých materiálů. I když byly moduly dimenzovány na vyšší zatížení a podrobeny základním pevnostním analýzám a kontrolním výpočtům, je potřeba udělat důkladnou optimalizaci celé konstrukce. Díly modulů jsou navrženy ze základních materiálů, jako je ocel a běžná hliníková slitina. Použitím speciálních lehkých materiálů, jako jsou uhlíkové kompozity nebo speciální letecké hliníkové slitiny může být dosaženo lepších hmotnostních parametrů při zachování únosnosti dílů.

V modulech nebyla vyřešena řídicí elektronika a software pro ovládání manipulátoru. Pro elektroniku jsou vyhrazené prostory a je nastíněno, kudy bude vedena kabeláž. Pro přenos energie a signálů mezi moduly jsou na propojovacích přírubách umístěny konektory, ty však nejsou dimenzovány na větší proudy, které by systémem mohly protékat. Kvůli malým zástavbovým prostorům by bylo vhodné navrhnout konektory vlastní konstrukce.

10 Zdroje informací

- [1] SKAŘUPA, J.; MOSTÝN, V. Metody a prostředky návrhu průmyslových a servisních robotů. 1. vydání. Košice: Viena Košice, 2002. 190 s. ISBN 80-88922-55-0
- [2] KALÁB, Květoslav. Části a mechanismy strojů pro bakaláře: Části spojovací. Ostrava, VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2007. 95 s. ISBN 978-80-248-1290-8
- [3] LEINVEBER, J., ŘASA, J., VÁVRA, P. Strojnické tabulky. Scientia spol. s.r.o, 1999, ISBN 80-7813-164-6.
- [4] SKAŘUPA, J. Průmyslové roboty a manipulátory. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita, 2007, 1 CD-R. ISBN 978-80-248-1522-0.
- [5] KÁRNÍK, L. Servisní roboty. 1. vydání. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2004. 139 s. ISBN 80-248-0626-6.
- [6] Advanced motion controls. Aplikace mobilních robotů [online] [cit.2014-11-21] Dostupné z: http://www.a-m-c.com/successes/industry_highlight/electric_mobility/index.html
- [7] Vecna labs. Vývoj mobilních robotů [online] [cit.2014-11-21] Dostupné z: <https://www.vecna.com/research>
- [8] Japan Earthquake: More Robots to the Rescue [online] [cit.2014-11-21] Dostupné z: <http://spectrum.ieee.org/autaton/robotics/industrial-robots/japan-earthquake-more-robots-to-the-rescue>
- [9] Mars science laboratory [online] [cit.2014-11-21] Dostupné z: <http://mars.jpl.nasa.gov/msl/>
- [10] Robot tEODor [online] [cit.2014-11-21] Dostupné z: [http://www.cobham.com/about-cobham/mission-systems/about-us/mission-equipment/unmanned-systems/products-and-services/remote-controlled-robotic-solutions/teodor-explosive-ordnance-\(eod\)-robot.aspx](http://www.cobham.com/about-cobham/mission-systems/about-us/mission-equipment/unmanned-systems/products-and-services/remote-controlled-robotic-solutions/teodor-explosive-ordnance-(eod)-robot.aspx)
- [11] Robot Talon [online] [cit.2014-11-21] Dostupné z: <https://www.qinetiq-na.com/products/unmanned-systems/talon/>
- [12] Robot Sally [online] [cit.2014-11-21] Dostupné z: <http://hub.jhu.edu/gazette/2013/july/features-robo-sally-useful-robot-applied-physics>
- [13] iRobot [online] [cit.2014-11-25] Dostupné z: <http://www.irobot.com/us/learn/defense/packbot.aspx>
- [14] Robot CUTLASS [online] [cit.2014-11-25] Dostupné z: <http://www.northropgrummaninternational.com/capabilities/cutlass/>

- [15] SCHUNK modular manipulator [online] [cit.2015-01-15] Dostupné z:
<http://mobile.schunk-microsite.com/en/produkte/produkte>
- [16] Dextrous manipulators and Advanced Control Systems [online] [cit.2015-01-15] Dostupné z: <http://www.robotics-research.com/>
- [17] KUKA LBR iiwa [online] [cit.2015-01-15] Dostupné z: http://www.kuka-labs.com/en/service_robotics/lightweight_robotics/
- [18] Kinova robotics,JACO [online] [cit.2015-01-15] Dostupné z: <http://kinovarobotics.com/>
- [19] Robot PIAP [online] [cit.2014-11-25] Dostupné z: <http://www.antiterrorism.eu/en/>
- [20] Robot CALIBER [online] [cit.2014-11-25] Dostupné z:
<https://icortechology.com/products/caliber-robots/>
- [21] LWR robot joint [online] [cit.2015-01-20] Dostupné z:
http://www.dlr.de/rm/en/desktopdefault.aspx/tabid-3803/6175_read-8961
- [22] Reconfigurable Modular Manipulator System [online] [cit.2015-01-20] Dostupné z:
http://www.ri.cmu.edu/research_project_detail.html?type=publication&project_id=105&menu_id=261
- [23] Harmonic Drive. Harmonické převodovky [online] [cit.2015-01-20] Dostupné z:
<http://harmonicdrive.de/>
- [24] SPINEA. Cykloidní převodovky a aktuátory [online] [cit.2015-01-20] Dostupné z:
<http://www.spinea.sk/>
- [25] Torque motor. Allied motion [online] [cit.2015-01-20] Dostupné z:
<http://www.alliedmotion.com/products/series.aspx?s=47>
- [26] Brushless pancake motors. Printed Motor Works [online] [cit.2015-01-20] Dostupné z:
<http://www.printedmotorworks.com/brushless-pancake-motors/>
- [27] Hollow shaft motor. Technohands [online] [cit.2015-01-20] Dostupné z:
<http://www.technohands.co.jp/en/products/hollow225.html>
- [28] Printed Motors. KN motor [online] [cit.2015-01-20] Dostupné z:
http://www.printedmotors.com/index_ger.html
- [29] Maxon motors [online] [cit.2015-01-20] Dostupné z:
<http://www.maxonmotor.com/maxon/view/content/index>

- [30] Animatics MOOG. SmartMotors [online] [cit.2015-01-20] Dostupné z:
<http://www.animatics.com/products/smartmotor.html>
- [31] Applimotion. BLDC motors [online] [cit.2015-01-20] Dostupné z:
<http://www.applimotion.com/>
- [32] SCHUNK. Changing accesories [online] [cit.2015-02-12] Dostupné z:
<http://www.gb.schunk.com/>
- [33] ATI industrial automation [online] [cit.2015-02-12] Dostupné z:
<http://www.ati-ia.com/Products/toolchanger/ManualToolChanger.aspx>
- [34] GIMATIC. Quick changer [online] [cit.2015-02-12] Dostupné z:
<http://www.gimatic.cz/en/products/plastics/cambia%20utensile>
- [35] Zimmer. Tool changer [online] [cit.2015-02-12] Dostupné z:
<http://www.zimmer-group.de/en/mainmenu/megamenu/coll1/handhabungstechnik/robotikprodukte-und-zubehor>
- [36] Interface advanced measurement [online] [cit.2015-02-12] Dostupné z:
<http://www.interfaceforce.com/>
- [37] Scaime. Weighing and sensing for industry [online] [cit.2015-02-12] Dostupné z:
http://www.scaime.com/index_en.html
- [38] HELICOIL. Závitová technologie [online] [cit.2015-04-10] Dostupné z:
<http://www.helicoil.cz/>
- [39] T.E.A Technik Spojka Oldham, Řemenice, Ozubený řemen [online] [cit.2015-04-10]
Dostupné z: <http://www.teatechnik.cz/>
- [40] Servocity. Modelářský servomotor[online] [cit.2015-05-02] Dostupné z:
https://www.servocity.com/html/hs-65mg_mighty_feather.html#.VU_P0vmvHIU
- [41] Servocity. Servoarm [online] [cit.2015-05-02] Dostupné z:
https://www.servocity.com/html/55707_single_arm.html#.VUiwgPmvHIU

11 Seznam příloh

Příloha A Návrhový výpočet manipulátoru v programu Mathcad

Příloha B CD s 3D dokumentací

Příloha C Výkresová dokumentace

- Sestavný výkres pohonného modulu s kusovníkem
 - 2-VYS0016-00
- Sestavný výkres hlavního rámu pohonného modulu s kusovníkem
 - 2-VYS0016-01
 - 4-VYS0016-01-K
- Sestavný výkres pohonné jednotky pohonného modulu s kusovníkem
 - 2-VYS0016-02
 - 4-VYS0016-02-K
- Sestavný výkres propojovacího modulu s kusovníkem
 - 2-VYS0016-11
 - 4-VYS0016-11-K
- Výrobní výkres hřídele hnací řemenice
 - 3-VYS0016-00-01
- Výrobní výkres hřídele hnací řemenice
 - 3-VYS0016-00-02